2018/3/31 EE 219 د. محمد موسى

مسائل محلولة عن الثنائيات (Diodes)

① - للدائرة الثنائي المبينة في الشكل أوجد تيار الدائرة I والجهد V_{ab} افرض أن الثنائي مثالي.

الحل :- حيث أن الثنائي مثالي إذن يمكن استبداله بدائرة قصر وتصبح الدائرة كالتالي

- بتطبيق قانون كيرشوف للجهد

$$30V - 3I + 10V - 8V = 0$$

بإعادة ترتيب حدود المعادلة

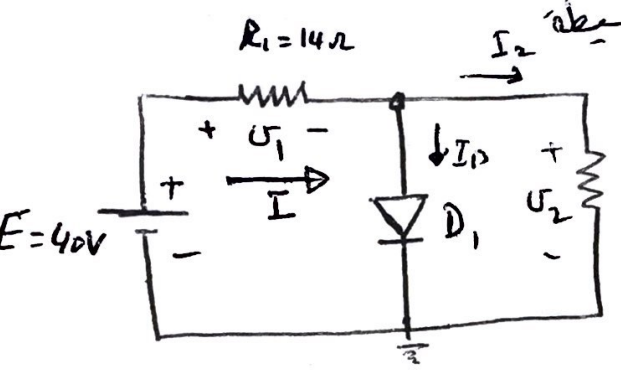
$$30V + 10V - 8V = 3I \Rightarrow 3I = 32$$

$$\therefore I = \frac{32}{3} = 10.67\ A$$

قيمة الجهد V_{ab}

$$V_{ab} = 8V$$

41 ورقة

② - لدائرة الثنائي المبينة في الشكل أوجد جهود المقاومات υ_1 ، υ_2 باستخدام الدائرة المكافئة المثالية ، الدائرة المكافئة البسيطة

الحل :-

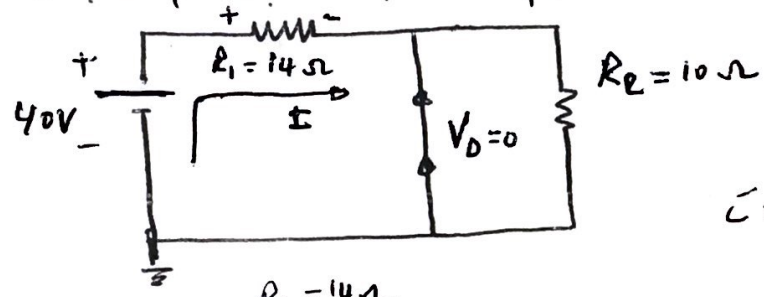
$R_1 = 14\Omega$, I_2, I_D, $R_2 = 10\Omega$, $E = 40V$, D_1, υ_1, υ_2, I

نتصور وضع مسار التيارات

بالمسار الثنائي في حالة التوصيل

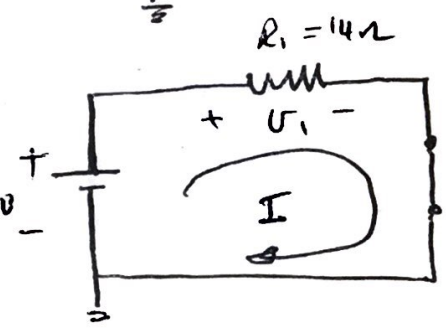
ونقوم برسم اتجاهات التيارات على الدائرة

أولاً :- حالة الثنائي المثالي - نقوم برسم الدائرة بعد استبدال الثنائي بدائرة قصر

$R_1 = 14\Omega$, $40V$, I, $V_D = 0$, $R_2 = 10\Omega$

- نلاحظ ان المقاومة R_2 اصبحت على التوازي مع دائرة القصر

- بتطبيق قانون توازي المقاومات

$$\frac{R_2 \times 0}{R_2 + 0} = 0$$

$R_1 = 14\Omega$, υ_1, I

- من الدائرة

$$I = \frac{40V}{14\Omega} = 2.86A$$

$$V_1 = I R_1 = (2.86A)(14\Omega) = 40V$$

$$\upsilon_2 = V_D = 0$$

ثانياً :- في حالة الدائرة المكافئة البسيطة ⇐ يتم استبدال الثنائي بمصدر جهد قدره

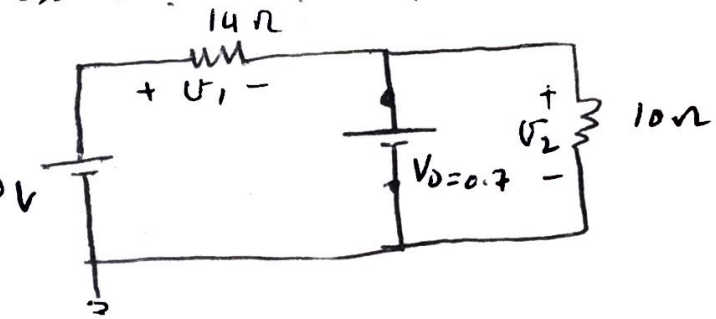
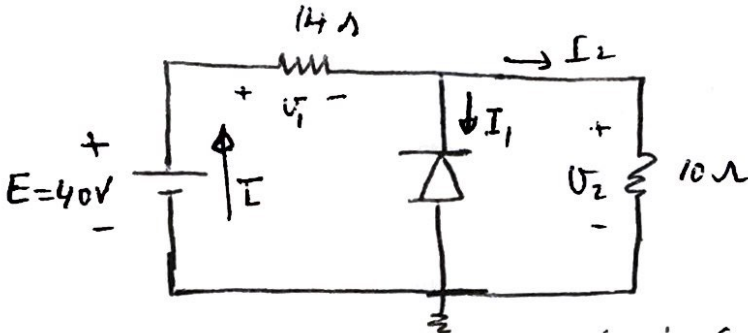
$$V_D = 0.7V$$

14Ω, υ_1, υ_2, 10Ω, $V_D = 0.7$

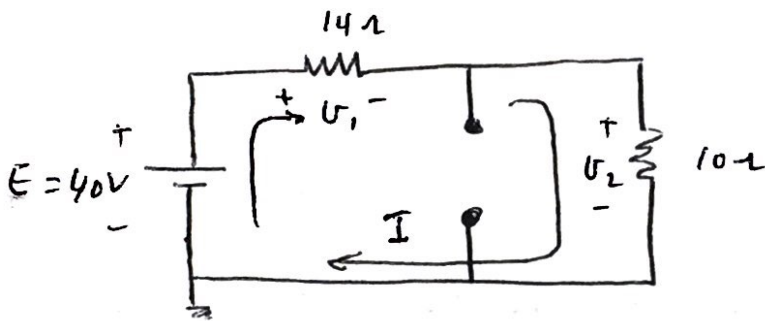
من الدائرة

$$V_2 = V_D = 0.7V$$

$$\upsilon_1 = 40 - 0.7 = 39.3V$$

م. م. محمود علي

③ - لدائرة الثنائي في المثال السابق اذا تم تغيير اتجاه الثنائي أوجد U_1 ، U_2

الحل :-

من الواضح ان الثنائي في حالة انحياز عكسي لا يمر سريان التيار عكس اتجاه الثنائي .

- في هذه الحالة سيكون الثنائي دائرة مفتوحة وبذلك تصبح الدائرة بالشكل التالي

- بتطبيق قانون كيرشوف للجهد

$$40V - I(14\Omega) - I(10\Omega) = 0$$

$$\therefore \quad 40V = I(14\Omega + 10\Omega) = I(24\Omega)$$

$$\therefore \quad I = \frac{40V}{24\Omega} = 1.67\,A$$

$$\therefore \quad U_1 = (1.67A)(14\Omega) = 23.3\,V$$

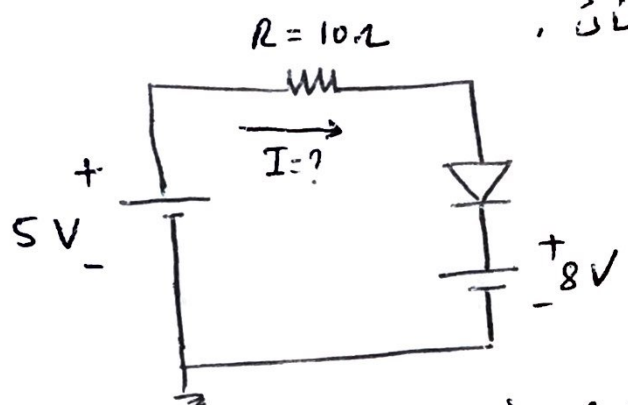
$$U_2 = (1.67A)(10\Omega) = 16.7\,V$$

للتحقق

$$\therefore \quad 23.3 + 16.7 = 40\,V$$

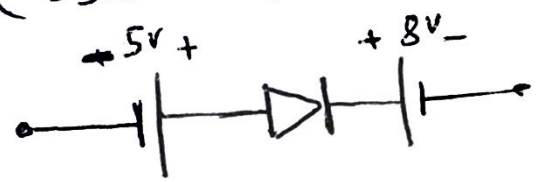
وهو يساوي جهد المصدر

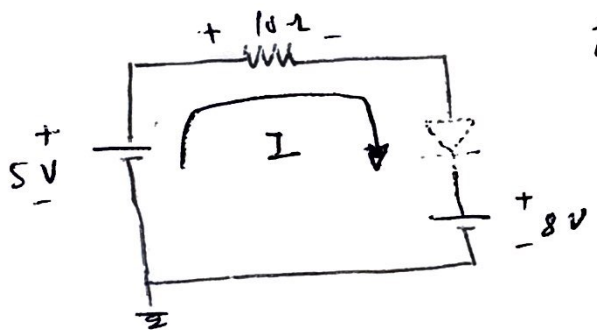
④ - للدائرة المبينة في الشكل أوجد حالة الثنائي (توصيل - عدم توصيل) وفي حالة التوصيل أوجد قيمة التيار الذي يمر في الثنائي .

$R = 10\Omega$, $I = ?$, $5V$, $8V$

الحل :-

من خلال النظر المتفحص في الدائرة نلاحظ أن الجهد على الكاثود أعلى من الجهد على الأنود وبالتالي سيكون الثنائي في حالة عدم التوصيل (الدائرة مفتوحة)

$-5V+$, $+8V-$

ويمكن الحل بطريقة أخرى

- نفرض أن الثنائي في حالة توصيل ونعيد رسم الدائرة
- نطبق قانون كيرشوف على الدائرة

$+10\Omega-$, I, $5V$, $8V$

$$\therefore -5V + I(10\Omega) + 8V = 0$$

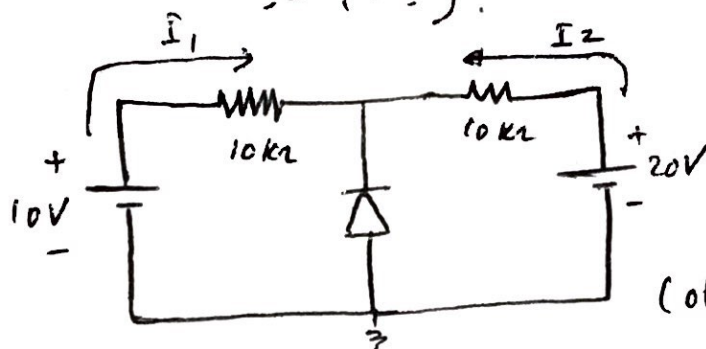
$$\Rightarrow I(10\Omega) = -5V - 8V$$

$$= -13V$$

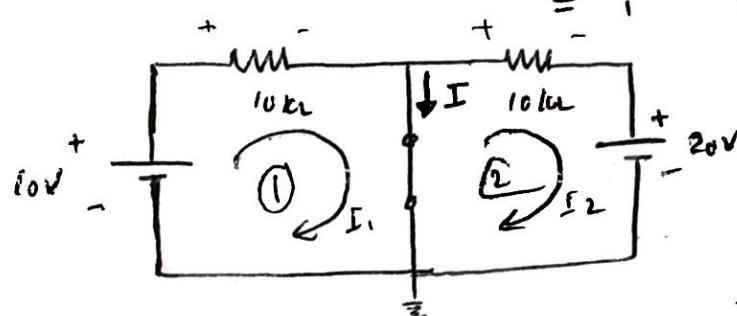
$$\therefore I = \frac{-13V}{10\Omega} = -1.3A$$

وحيث أن التيار في الثنائي لا يمكن أن يكون سالبا
لذا الافتراض السابق خطأ والثنائي لا يوصل في هذه الحالة

م.م. محمد ... الكترونيك

٥ - لدائرة الثنائي المبينة في الشكل حدد ما اذا كان الثنائي في حالة توصيل أو عدمه واذا كان الثنائي في حالة (on-state) أوجد التيار المارفيه.

الحل :-

- باستخدام النظر في مكونات الدائرة واتجاه التيارات خارجة من المنابع أن الثنائي سيكون في حالة (off-state) عدم التوصيل.

ولاثبات ذلك من خلال تحليل الدائرة نفرض أن الثنائي في حالة التوصيل ويتم استبدال الثنائي بنموذج الثنائي المثالي.

KVL :-

المسار رقم ①

$$-10V + (10k\Omega)(I_1) = 0$$

$$\therefore I_1 = 1mA$$

المسار رقم ②

$$(10k\Omega)(I_2) + 20V = 0$$

$$\therefore I_2 = -2mA$$

بتطبيق قانون كيرشوف للتيار

$$I + I_1 = I_2 \Rightarrow I = I_2 - I_1$$

$$= -2mA - 1mA$$

$$= -3mA$$

∴ الدائرة تكون كالتالي
بتطبيق قانون كيرشوف للجهد

$$20 - V_{R_1} - V_{R_2} - 10V = 0$$

$$\therefore 20 - 10 = V_{R_1} + V_{R_2} = 2V_R$$

حيث أن $R_1 = R_2$

$$10V = 2V_R \quad \therefore V_R = \frac{10}{2} = 5$$

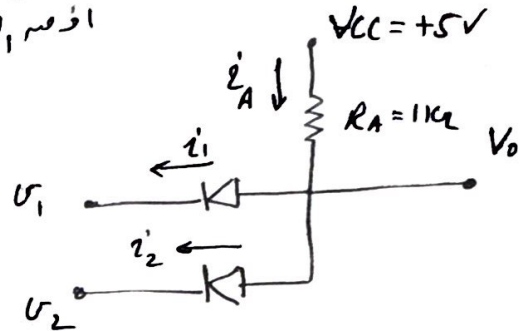
$$\therefore V_{R_1} = 5 \text{ Volt}$$
$$V_{R_2} = 5 \text{ Volt}$$

$$20 - 5 - 5 - 10 = 0 \quad \#$$

∴ التيار خلال الثنائي لا يكون سالباً ∴ الافتراض السابق بأن الثنائي في حالة توصيل خطأ، ولذلك يكون الثنائي في حالة عدم التوصيل.

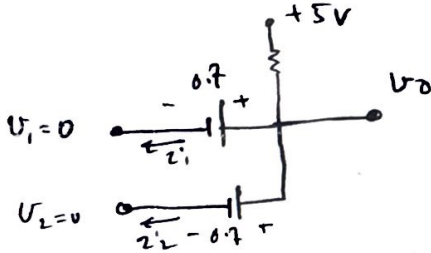
⑥ - للدائرة الثنائيات المبينة في الشكل والتي تمثل البوابة المنطقية AND حقق جدول الحقيقة لهذه البوابة افرض انه
(0V → lowstate), (5V highstate)
افرض النموذج البسيط للثنائي

$V_{CC} = +5V$, i_A, $R_A = 1k\Omega$, V_o, i_1, v_1, i_2, v_2

الحل :- بتطبيق قانون كيرشوف للتيار على الدائرة نحصل على

$$i_A = i_1 + i_2$$

الحالة الاولى :- عندما يكون $v_1 = v_2 = 0$

في هذه الحالة الثنائيان في حالة توصيل وتصبح الدائرة كالتالي

$+5V$, 0.7, v_o, $v_1 = 0$, i_1, $v_2 = 0$, i_2, 0.7

∴ $V_{D_1} = V_{D_2} = 0.7V$

$i_1 > 0$ $\quad$ $i_2 > 0$

$V_o = v_1 + v_{D_1} = v_2 + v_{D_2} = 0.7V$

$$i_A = \frac{V_{CC} - V_o}{R_A} = \frac{5V - 0.7V}{1k\Omega} = 4.3mA$$

حيث أن فرعي الثنائيان متماثلان اذن التيار i_A سيتوزع على الفرعين بالتساوي

$i_1 = i_2 = \frac{1}{2} i_A \Rightarrow i_1 = i_2 = 2.1mA$

وحيث أن تيارات الثنائيات موجبة اذن الثنائيان D_1, D_2 في حالة انحياز امامي (حالة التوصيل)

∴ عندما يكون جهد v_1, v_2 منخفض (low) يكون الثنائيان D_1, D_2 في حالة التوصيل ويكون جهد الخرج منخفض $(V_o = 0.7V)$

الحالة الثانية :- عندما يكون $v_1 = 0V, v_2 = 5V$

- في هذه الحالة سيكون الثنائي D_1 في حالة توصيل (D_1 is ON)

∴ $V_{D_1} = 0.7V$ و $i_1 > 0$

∴ $V_o = v_1 + V_{D_1} = 0 + 0.7V = 0.7V$

$v_o = V_2 + V_{D_2} \Rightarrow 0.7 = 5V + V_{D_2} \Rightarrow V_{D_2} = 0.7 - 5 = -4.3V$

وحيث أن الجهد V_{D2} سالب وهو اقل من جهد العتبة (0.7V) إذن الثنائي D_2 في حالة عدم التوصيل (off-state) والتيار $(i_2=0)$

$$\therefore \quad i_A = \frac{V_{CC} - V_o}{R_A} = \frac{5-0.7}{1k\Omega} = 4.3\,mA$$

$$i_1 = i_A - i_2 = 4.3 - 0 = 4.3\,mA$$

وحيث أن التيار (i_1) أكبر من الصفر (موجب) إذن تحققت الفرضية الاولى بان الثنائي D_1 في حالة توصيل وجهد الخرج يساوي $(V_o = 0.7V)$

$\therefore$ عندما يكون V_1 منخفض و V_2 عالي يكون الثنائي D_1 في حالة توصيل والثنائي D_2 في حالة عدم التوصيل ويكون جهد الخرج منخفض.

الحالة الثالثة :- عندما يكون $V_1 = 5V\,,\ V_2 = 0V$

تحليل هذه الحالة يتم بنفس الخطوات في الحالة الثانية مع الأخذ في الاعتبار عكس القواعد الخاصة بالثنائيات D_1 ، D_2 وبالتالي

$\therefore$ عندما يكون جهد V_1 (عالي) وجهد V_2 (منخفض) يكون الثنائي D_1 في حالة عدم التوصيل و الثنائي D_2 في حالة التوصيل ويكون جهد الخرج منخفضاً.

الحالة الرابعة :- عندما يكون $V_1 = V_2 = 5V$

من خلال الدائرة يتضح أن جهد المصدر لا يكون قادراً على جعل الثنائيات أو احدهما في حالة توصيل وبالتالي نفرض ان D_1 ، D_2 في حالة عدم توصيل وينتج عن ذلك

$i_1 = i_2 = 0$ ، $V_{D_1} < 0.7V$ ، $V_{D_2} < 0.7V$

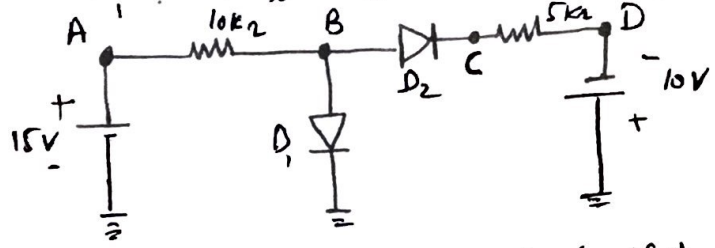
$$V_o = V_{CC} - i_1 R_A = 5V - (0)R_A = 5V$$

$$\therefore \quad i_A = i_1 + i_2 = 0 \qquad V_{D_2} = V_o - V_2 = 5 - 5 = 0 < 0.7V$$

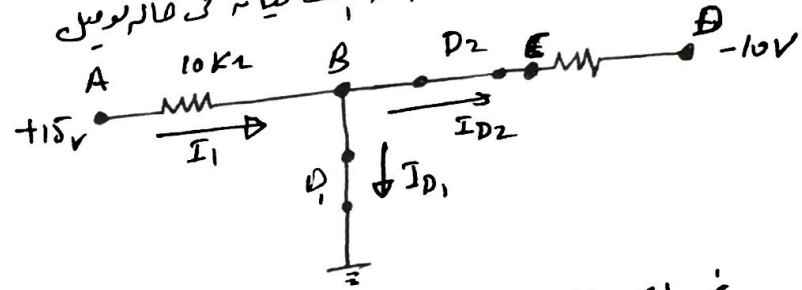
$$V_{D_1} = V_o - V_1 = 5 - 5 = 0 < 0.7V$$

$\therefore$ الفرضية بأن الثنائيات في حالة عدم التوصيل صحيحة

- عندما يكون V_1 (عالية) ، V_2 (عالية) يكون الثنائيان D_1 ، D_2 في حالة عدم التوصيل ويكون جهد الخرج V_o (عالياً)

⑦ لدائرة الثنائيات المبينة في الشكل حدد حالة كل ثنائي ثم اوجد التيارات وجهود الثنائيات افرض النموذج المثالي للثنائي.

الحل :ـ الحالات المحتملة للثنائيات

D_1	D_2
عدم توصيل	عدم توصيل
عدم توصيل	توصيل
توصيل	عدم توصيل
توصيل	توصيل

الحالة الأولى :ـ افرض ان الثنائيات في حالة توصيل

A +15V — 10KΩ — B — D2 — E — D −10V ; I_1 ، I_{D2} ، D_1 ، I_{D1}

نجد التيارات I_{D1} ، I_{D2} (ملاحظ :ـ جهد النقطة B = 0 لان الثنائي على دائرة قصر الارضي)

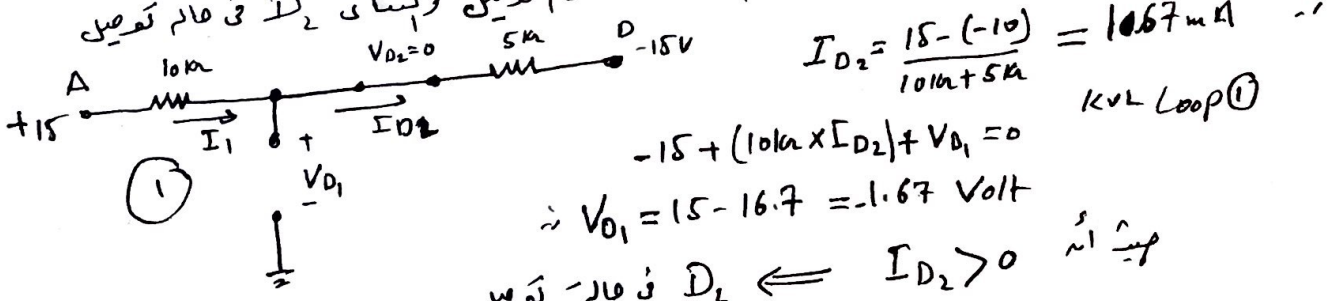
$$I_1 = \frac{15-0}{10k\Omega} = 1.5\,mA$$

$$\therefore I_{D2} = \frac{0-(-10V)}{5k\Omega} = 2\,mA$$

من الدائرة $I_1 = I_{D1} + I_{D2}$ ⟸ $I_{D1} = I_1 - I_{D2} = 1.5 - 2 = -0.5\,mA$

حيث ان $(I_{D1} < 0)$ سالب اذن الفرضية بان الثنائي D_1 في حالة انحياز امامي غير صحيحة

الحالة الثانية :ـ نفرض ان الثنائي D_1 في حالة عدم توصيل والثنائي D_2 في حالة توصيل

A +15 — 10kΩ — $V_{D2}=0$ — 5kΩ — D −15V ; I_1 ، I_{D2} ، V_{D1} ، ①

$$\therefore I_{D2} = \frac{15-(-10)}{10k\Omega+5k\Omega} = 1.67\,mA$$

KVL Loop ①

$$-15 + (10k\Omega \times I_{D2}) + V_{D1} = 0$$

$$\therefore V_{D1} = 15 - 16.7 = -1.67\ Volt$$

حيث انه $I_{D2} > 0$ ⟸ D_2 في حالة توصيل

$V_{D1} < 0$ ⟸ D_1 في حالة عدم التوصيل (انحياز عكسي)

هذا تتطابق مع فرضيات الحالة الثانية وهو المطلوب

⑧ - لدوائر الثنائي المبينة في الشكل أوجد التيار I (استخدم النموذج المبسط للثنائي)

Si 10Ω
E = 12V
I

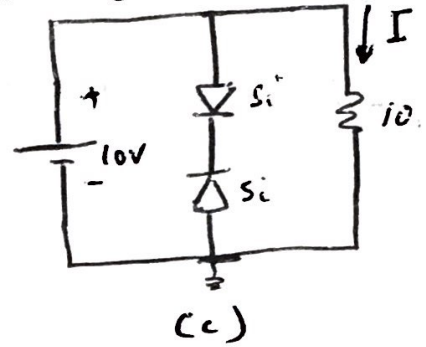
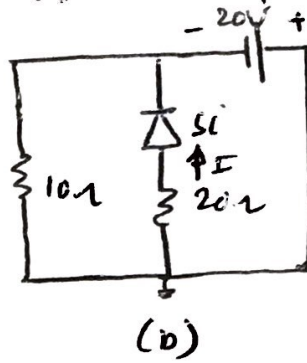
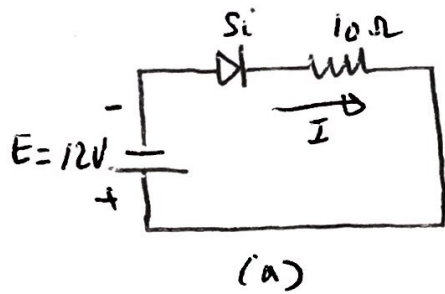
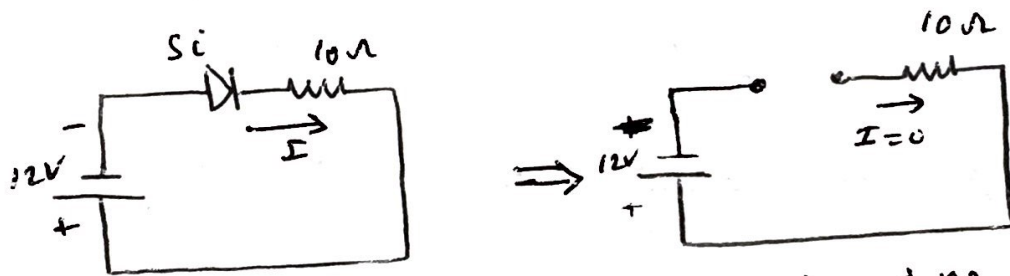
(a)

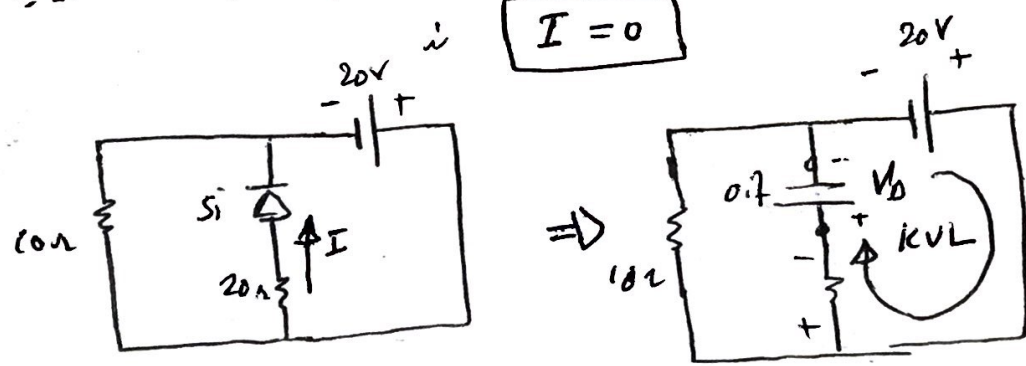
(b)

(c)

الحل :-

الدائرة (a) :-

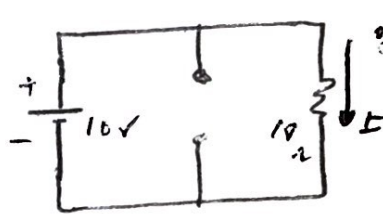
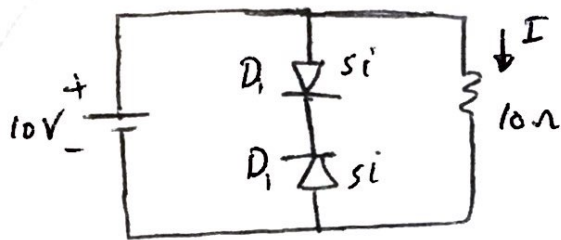
Si 10Ω
12V
I

من الواضح ان أنود الثنائي مربوط على الجهد السالب وبالتالي فان الثنائي سيكون في منطقة الانحياز العكسي ويستبدل بدائرة مفتوحة كما هو مبين في الشكل المكافئ وعليه

∴ $I = 0$

الدائرة (b) :-

من خلال الدائرة يتضح أن الانود الثنائي مربوطا على الجهد الموجب وبالتالي سيكون في انحياز امامي ويستبدل بالدائرة المكافئة المبسطة وبعد رسم الدائرة المكافئة

- بتطبيق قانون كيرشوف كما هو مبين في الشكل

$$V_{R=20\Omega} = 20V - 0.7 = 19.3\ V$$

$$\therefore I = \frac{19.3V}{20\Omega} = 0.965\ A$$

تابع المسألة الثامنة

الدائرة (C) :

- من خلال الدائرة يتضح أن الثنائي D_1 يمكن أن يكون في حالة انحياز أمامي ويكون الثنائي D_2 العاكس لا يمكن أن يكون في حالة انحياز أمامي . وبالتالي نهمل فرع الدائرة المركزي فيكون دائرة مفتوحة كما هو مبين في الشكل .

$$\boxed{I} = \frac{10V}{10\Omega} = \boxed{1A}$$

⑨ - لدائرة الثنائي المبينة في الشكل أوجد كل من جهد المخرج وتيار الثنائي I_D

* الثنائي في حالة انحياز أمامي

(a)

KVL: $-5V + 0.7V + V_o = 0$

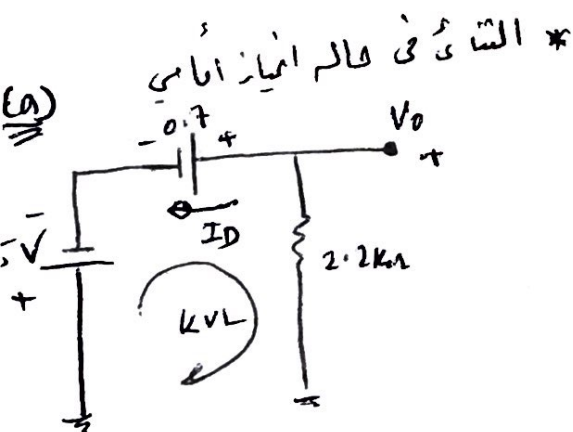
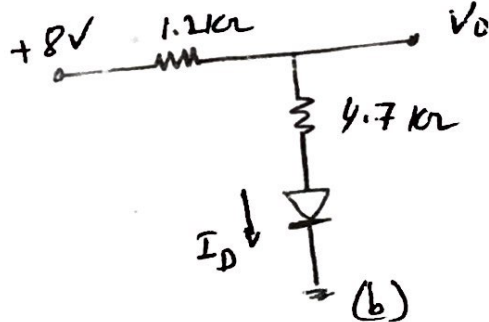
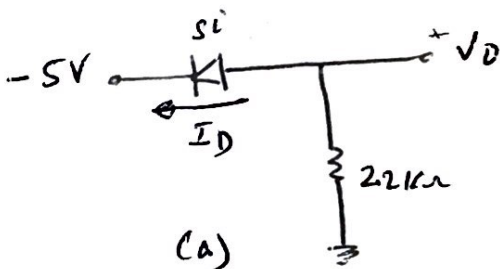
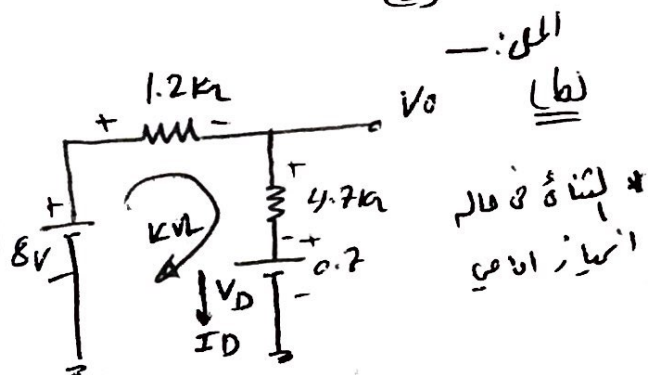
$\therefore \boxed{V_o = +4.3V}$

$$I_R = I_D = \frac{V_o}{R} = \frac{4.3V}{2.2k\Omega} = 1.955\,mA$$

الحل :—

(b)

* الثنائي في حالة انحياز أمامي

1.2kΩ — V_o — 8V — KVL — 4.7kΩ — 0.7 — V_D — I_D

KVL

$$8V - 0.7V = I_D(1.2k\Omega + 4.7k\Omega)$$

$$\therefore I_D = \frac{8V - 0.7V}{1.2k\Omega + 4.7k\Omega} = \boxed{1.24\,mA}$$

$$V_o = I_D(4.7k\Omega) + V_D$$

$$= (1.24mA)(4.7k\Omega) + 0.7 = \boxed{6.53V}$$

⑩ ـ أوجد مستوى جهد الخرج للدائرتين الثنائيتين المبينتين في الشكل

10V — 1.2kΩ — Si — Vo, 4.7kΩ, −2V

الحل :ـ

ثنائي السيليكون في انحياز أمامي

1.2kΩ, +0.7−, I, 4.7kΩ, 10V, KVL, 2V, Vo

$$10V + 2V - 0.7V = I\,(1.2k\Omega + 4.7k\Omega)$$

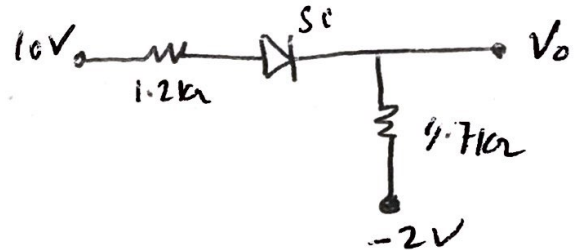
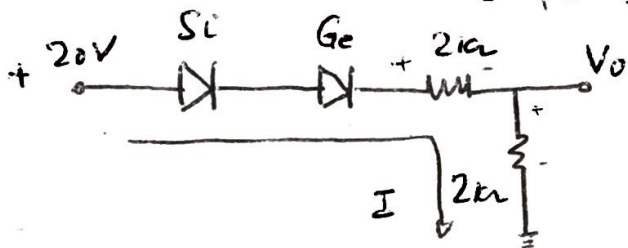
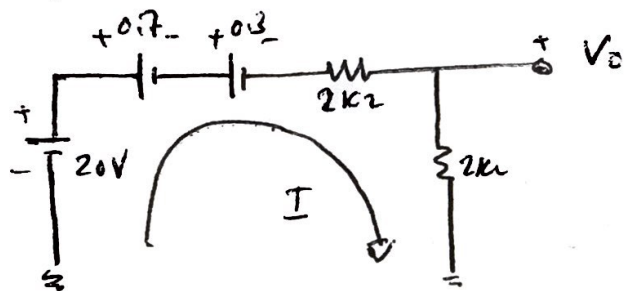
$$I = \frac{11.3\,V}{5.9\,k\Omega} = 1.915\,mA$$

$$V_{R(4.7k\Omega)} = I\,(4.7k\Omega) = (1.915\,mA)\,(4.7k\Omega) = 9\,V$$

$$V_o = 9V - 2V = 7\,Volt$$

#

ثنائيين السيليكون والجرمانيوم في انحياز أمامي

+0.7−, +0.3−, 2kΩ, Vo, 20V, I, 2kΩ

$$I = \frac{(20V - 0.7V - 0.3V)}{(2k\Omega + 2k\Omega)} = $$

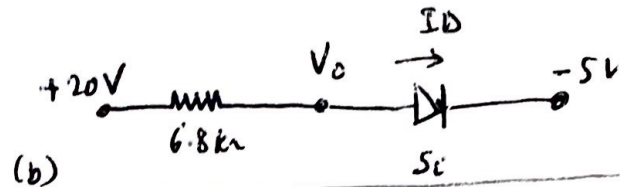
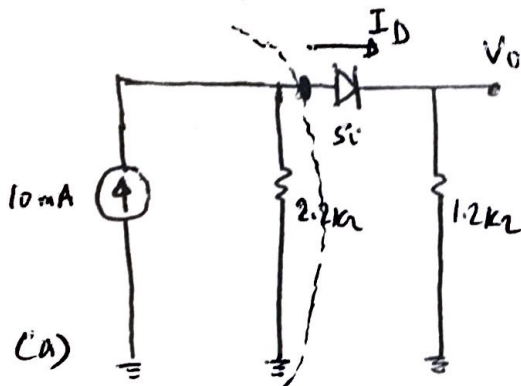
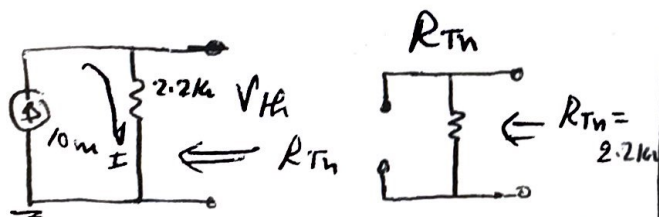
$$V_o = I R_2 = \left[\frac{(20V - 0.7 - 0.3)}{(2k\Omega + 2k\Omega)}\right](2k\Omega)$$

$$V_o = \frac{1}{2}(20V - 1V) = \frac{1}{2}(19) = 9.5V$$

+20V, 6.8kΩ, V_o, I_D, Si, −5V

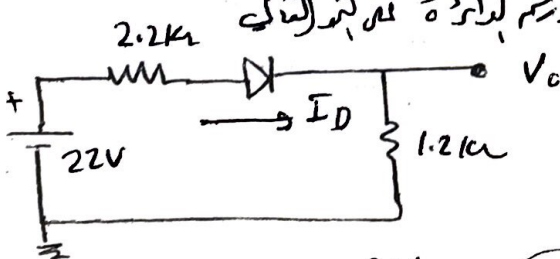
(b)

6.8kΩ, +20V, I_D, 0.7V, −5V, + V_o, KVL

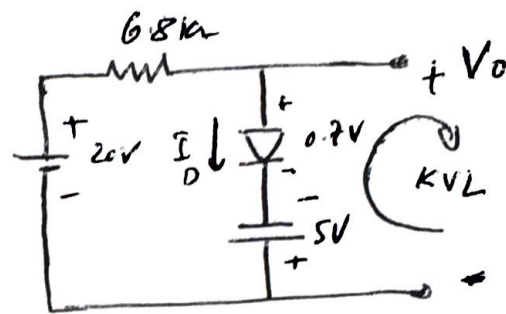
$$I_D = \frac{20V + 5V - 0.7V}{6.8\,k\Omega} = 2.65\,mA$$

في هذه الدائرة لدينا مصدر تيار على التوازي مع المقاومة 2.2kΩ ولكي نحول الدائرة إلى دائرة توالي بسيطة يجب نجد الدائرة المكافئة لثفنن كالآتي

$$V_{Th} = IR = (10mA)(2.2k\Omega) = 22\,V$$

- نعيد رسم الدائرة على النحو التالي

2.2kΩ, V_o, I_D, 22V, 1.2kΩ

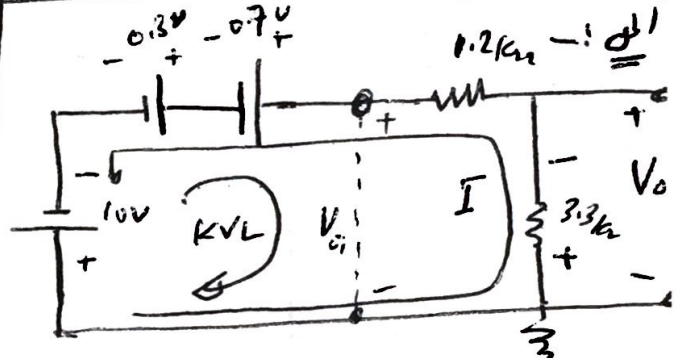
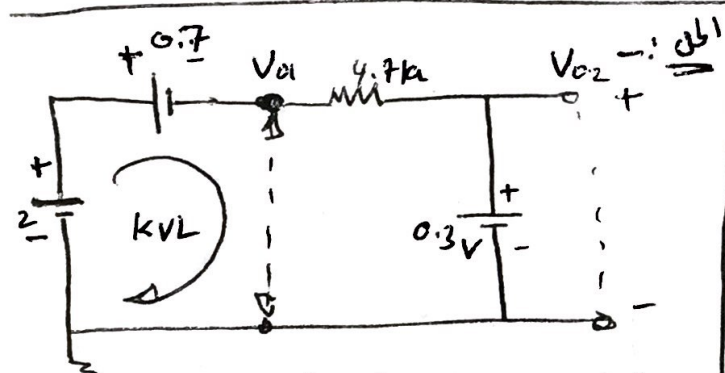
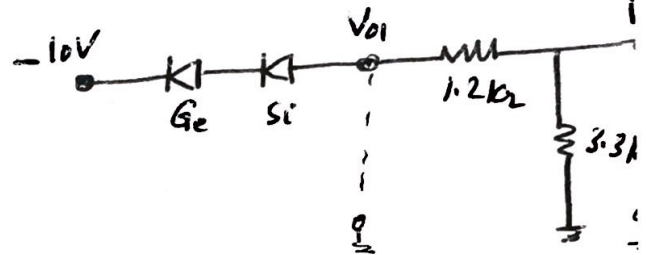
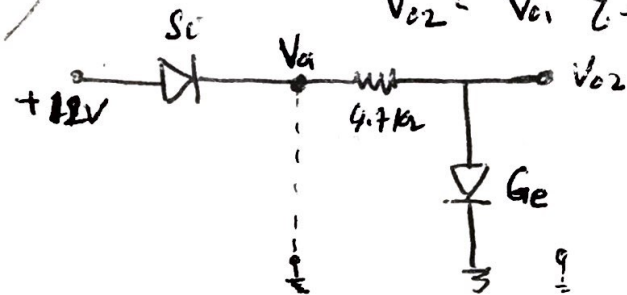
$$V_o + 5V - 0.7V = 0$$

$$\therefore V_o = (5 - 0.7)V = 4.3\,V$$

$$\therefore I_D = \frac{22V - 0.7V}{2.2k\Omega + 1.2k\Omega} = 6.26\,mA$$

$$V_o = I_D(1.2k\Omega) = (6.26mA)(1.2k\Omega) = 7.51V$$

#

⑫ - لدائرة الثنائي المبينة في الشكل أوجد الجهد الخارج V_{o1} ، V_{o2}

الحل :-

الحل :-

- الثنائيان في حالة انحياز أمامي

$\therefore V_{o1} = 12V - 0.7V = 11.3V$

$V_{o2} = 0.3V$

$V_{o1} = -10V + 0.3V + 0.7V$

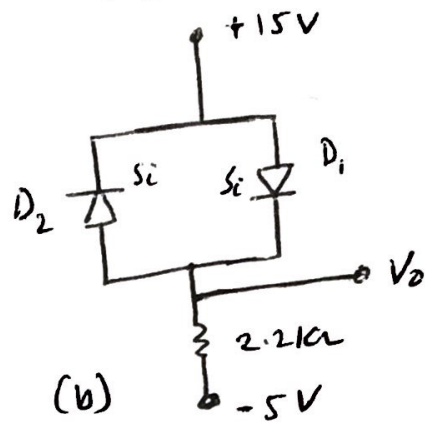
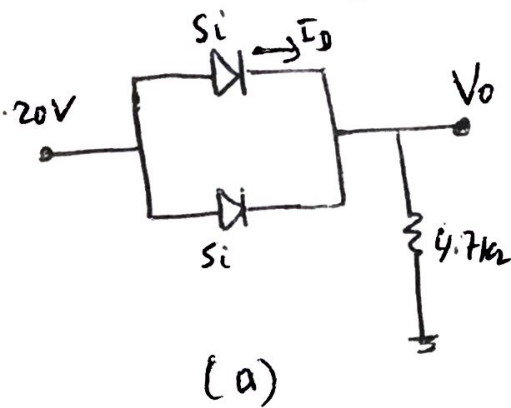
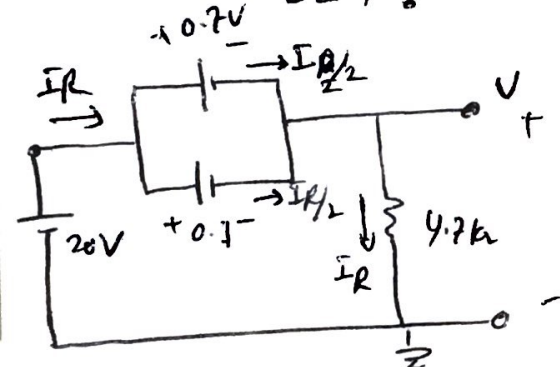
$V_{o1} = -9 \text{ Volt}$

$$I = \frac{10V - 0.7V - 0.3V}{1.2k\Omega + 3.3k\Omega}$$

$I = 2mA$

$V_{o2} = -(2mA)(3.3k\Omega)$

$V_{o2} = -6.6V$

13 - للدائرة الثنائي المبينة في الشكل أوجد كل من V_o ، I_D

a) الثنائيان في حالة انحياز أمامي ونفرض ان الثنائيان متطابقان تماما

$$I_R = \frac{20V - 0.7V}{4.7k\Omega} = 4.106\,mA$$

$$I_D = \frac{I_R}{2} = \frac{4.106\,mA}{2} = 2.05\,mA$$

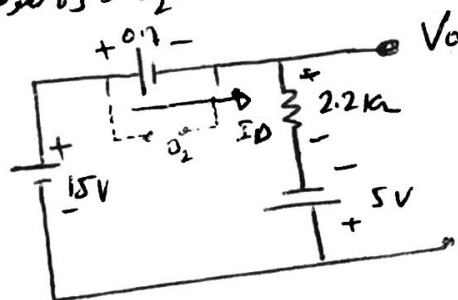
$$V_o = 20V - 0.7V = 19.3\,V$$

أو

$$V_o = I_R\,(4.7k\Omega)$$

$$= (4.106\,mA)(4.7k\Omega)$$

$$= 19.3\ \text{Volt}$$

b) الثنائيان متعاكسان من المواقع في الدائرة
ان الثنائي D_1 في انحياز امامي و D_2 دائرة مفتوحة

$$I_D = \frac{15V + 5V - 0.7V}{2.2\,k\Omega} = 8.77\,mA$$

$$V_o = 15V - 0.7 = 14.3\,V$$

أو

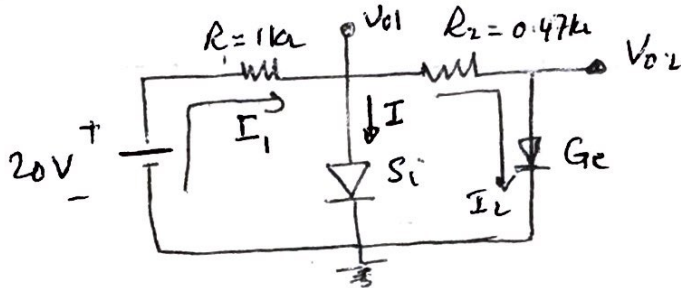
$$V_o = (8.77\,mA)(2.2) - 5V$$

$$= 14.3\ \text{Volt}$$

عملي

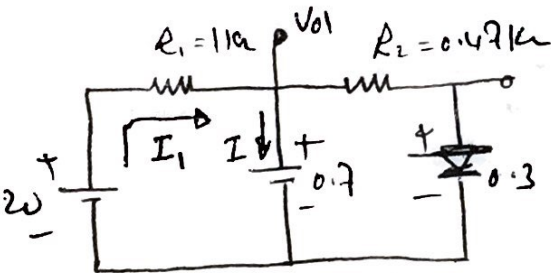
(14) - لدائرة الثنائيات المبينة في الشكل التالي أوجد V_{o1} ، V_{o2} والتيار I

$R_1 = 1k\Omega$ V_{o1} $R_2 = 0.47k\Omega$ V_{o2}

$20V$ I_1 I Si I_2 Ge

الحل :- من خلال الدائرة يتضح أنه مصدر الجهد سيولد التيار I_1 الذي سيتوزع على فرعي الثنائيات خلال المقاومات R_1 ، R_2 وبالتالي فإن التيارات الفرعية تشكل في نفس اتجاه السهم للثنائيات وبديهيًا نفترض ان الثنائيات في حالة انحياز امامي .

$R_1 = 1k\Omega$ V_{o1} $R_2 = 0.47k\Omega$

20 I_1 I 0.7 0.3

- عندما يكون الثنائي (Si) في انحياز امامي

$\therefore V_{o1} = 0.7V$

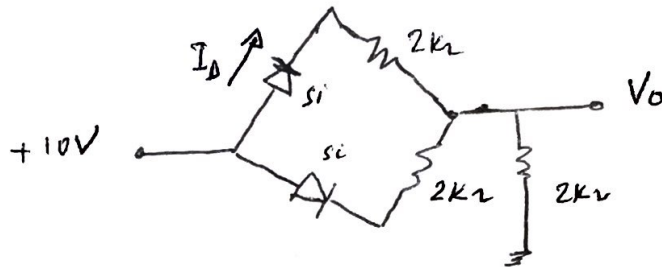
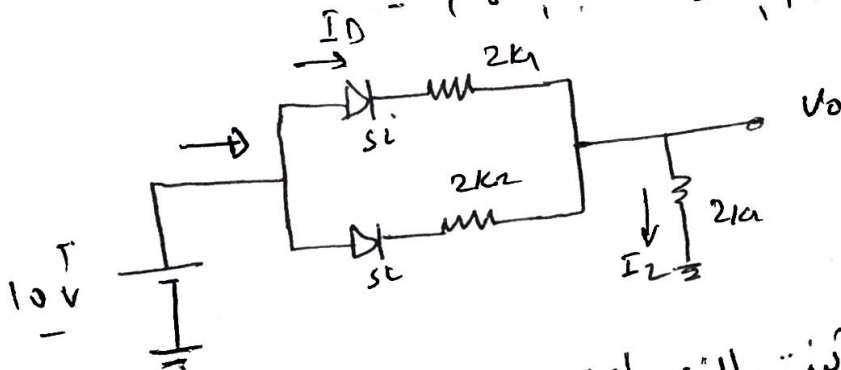
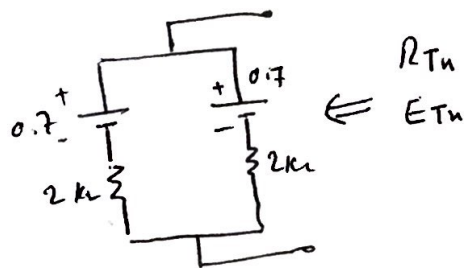
- عندما يكون الثنائي (Ge) في انحياز يكون الجهد $V_{o2} = 0.3V$

$$I_1 = \frac{20V - 0.7V}{1k\Omega} = \frac{19.3V}{1k\Omega} = 19.3\,mA$$

$$I_2 = \frac{0.7V - 0.3V}{0.47k\Omega} = 0.851\,mA$$

$I_1 = I + I_2$

$$I_{(Si)} = I_1 - I_2 = 19.3\,mA - 0.851\,mA$$

$$= 18.45\,mA$$

⑮ للدائرة الثنائيات المبينة في الشكل أوجد كل من Vo ، ID
ID
2kΩ
Si
Vo
+10V
Si
2kΩ
2kΩ
الحل :- يمكن اعادة رسم الدائرة حسب الشكل التالي
ID
2kΩ
Vo
Si
2kΩ
2kΩ
Si
I2
10V
يمكن ايجاد دائرة ثيفنن للفرعين المتوازيين (ثنائي + مقاومة 2 كيلو اوم)
- استبدال المصادر بدائرة قصر
0.7
0.7
2kΩ
2kΩ
RTh
ETh
RTh = 2kΩ*2kΩ / 2kΩ+2kΩ
= 1kΩ
ETh = 0.7V
في الدائرة الرئيسية تستبدل بالدائرة المكافئة التالية
باستخدام قاعدة مجزئ الجهد
I
0.7
1kΩ
Vo
ETh RTh
2kΩ
I2
Vo = 2kΩ (10V − 0.7)V / 1kΩ + 2kΩ = 6.2V
I2 (2kΩ) = 6.2V / 2kΩ = 3.1 mA
I = I2
من الدائرة
∴ ID = I / 2 = 3.1mA / 2 = 1.55 mA
16

(16) - أوجد جهد الخرج للدائرة المبينة في الشكل اذا كان $(V_1 = 0)$ ، $(V_2 = 0)$

V1   D1   0V
D2   0V V2   Vo   R=1kΩ

الحل :- الثنائيات سيكونان في حالة انحياز عكسي (off-state)

- لأنه كل ثنائي يحتاج إلى جهد $(V_0 \geq 0.7)$ وهذا ليس متاح في هذه الحالة

لذا جهد الخرج

$$V_0 = 0$$

(17) - أوجد جهد الخرج للدائرة المبينة في الشكل التالي

Si   5V
5V   Ge   Vo   2.2kΩ

الحل :- الثنائيات في فرعين متوازيين لذا لابد ان تتساوى جهد الفرعين

- ثنائي الجرمانيوم سيصبح في حالة توصيل قبل ثنائي السيليكون

لذا جهد الفرع المتوازي سيكون (0.3V)

وبالتالي سوف يكون ثنائي السيليكون في حالة عدم توصيل

⇒

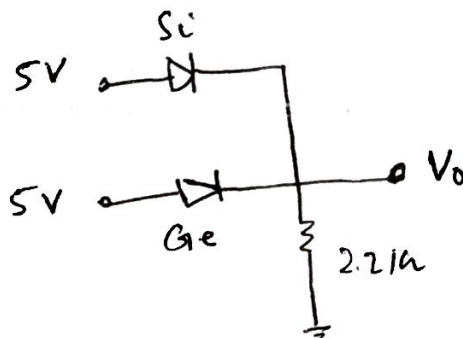
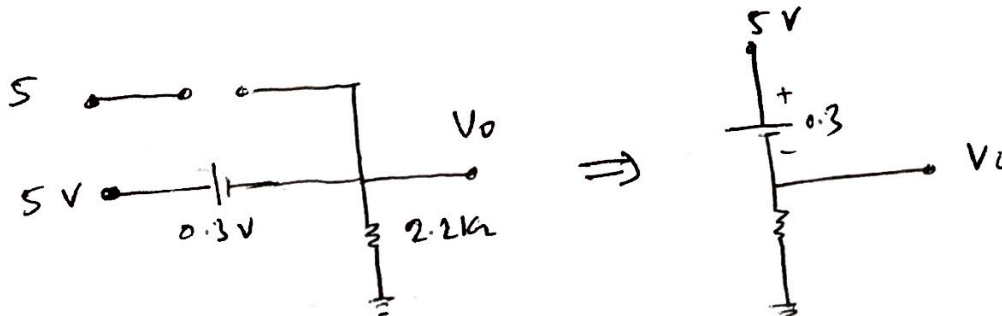
لذا جهد الخرج

$$V_0 = (5 - 0.3)V$$

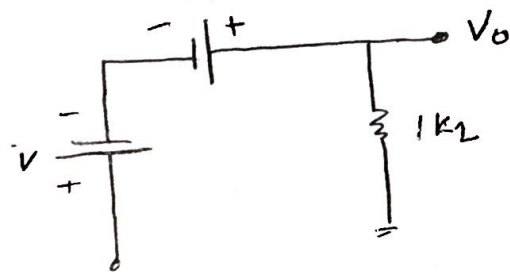
$$V_0 = 4.7V$$

(18) - للبوابة (OR) المبينة في الشكل التالي أوجد جهد الخرج V_o

-5V ، 0V ، D_1 ، D_2 ، Sc ، V_o ، 1kΩ

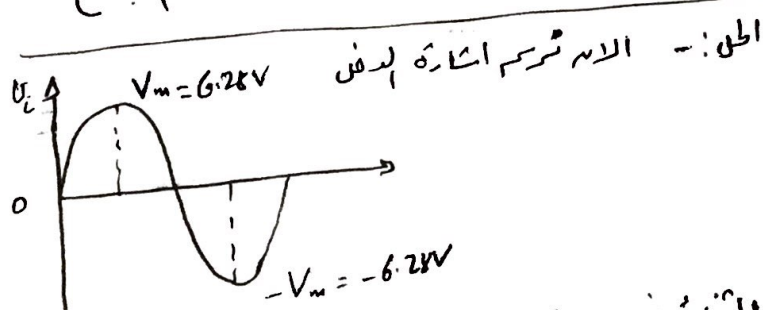
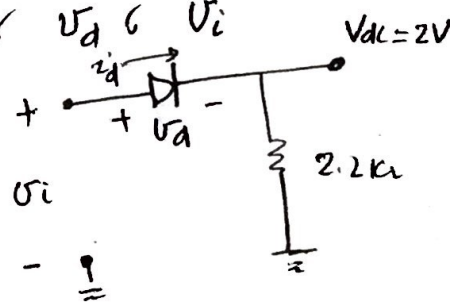
الحل :- من الواضح ان الكاثود للثنائي D_1 أكثر سالبية من الكاثود للثنائي D_2

- انود D_1 مربوط مع أنود D_2 اي انهما على نفس الجهد

- في هذه الحالة سيكون الثنائي D_1 (on-state) ، الثنائي D_2 (off-state)

$$V_o = -5 + 0.7 = -4.3V$$

0.7 ، V_o ، 1kΩ ، V

(19) - للدائرة المبينة في الشكل التالي وافترض النموذج الثنائي المثالي أرسم كل من V_i ، V_d ، i_d اذا علمت أن (f=60Hz) . الدائرة مقوم نصف الموجة)

$V_{dc} = 2V$ ، i_d ، V_d ، V_i ، 2.2kΩ

من معلوماتنا حول مقوم نصف الموجة أنه

$$V_{dc} = 0.318\, V_m$$

من هذه العلاقة نحسب قيمة V_m

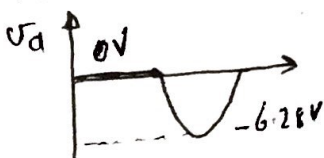
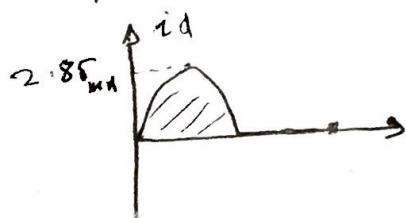
$$V_m = \frac{V_{dc}}{0.318} = \frac{2V}{0.318} = 6.28$$

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{6.28V}{2.2k\Omega} = 2.85\, mA$$

الحل :- الان نرسم اشارة الدخل

V_i ، $V_m = 6.28V$ ، 0 ، $-V_m = -6.28V$

الثنائي في حالة التوصيل عبارة عن دائرة قصر ودائرة مفتوحة في حالة عدم التوصيل

V_d ، 0V ، -6.28V

الثنائي يوصل تيار في حالة (on-state) ولا يوصل تيار في حالة (off-state)

i_d ، 2.85 mA

(٢٥) ـ لدائرة مقوم نصف الموجة وبافتراض النموذج البسيط ارسم شكل اشارة الدخل v_i والجهد على الثنائي وتيار الثنائي (ثنائي سيليكون)

i_d , $+ \; v_d \; -$, $V_{dc} = 2V$, $2.2k\Omega$, v_i

الحل :ـ

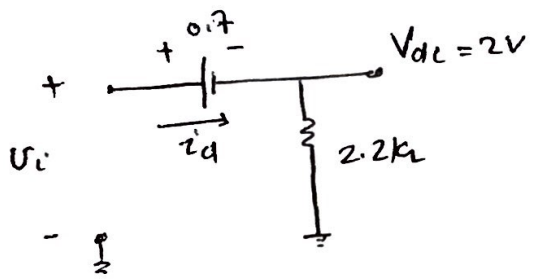
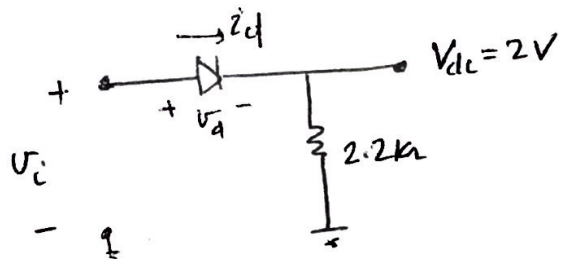
في هذه الحالة

0.7 , $V_{dc} = 2V$, i_d , $2.2k\Omega$, v_i

$$V_{dc} = 0.318 (V_m - V_T)$$

$$2V = 0.318 (V_m - V_T)$$

$$\therefore V_m = 6.98 V$$

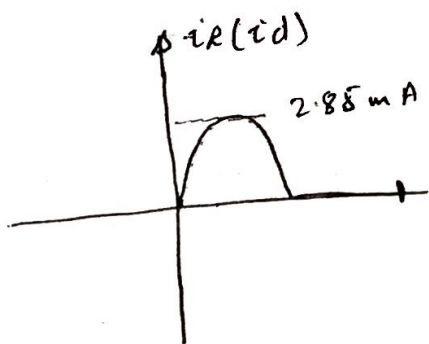
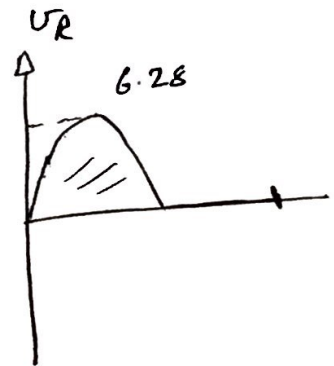
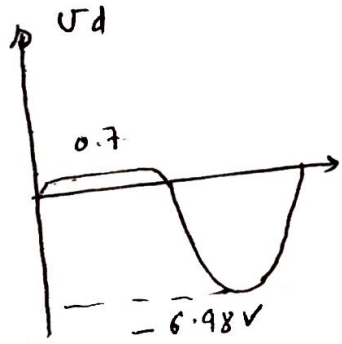
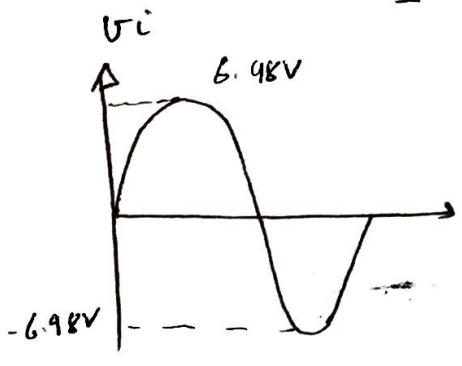
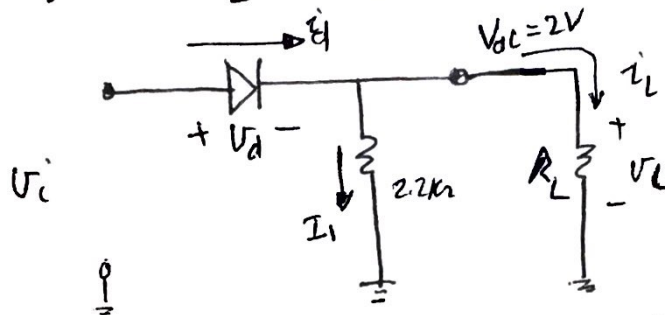
النسبة

$$V_m : V_T \cong 10 : 1$$

$$I_m = \frac{V_m - V_T}{2.2k\Omega}$$

$$= \frac{6.98V - 0.7V}{2.2k\Omega} = \frac{6.28}{2.2k\Omega}$$

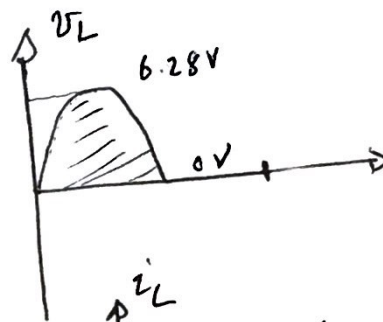
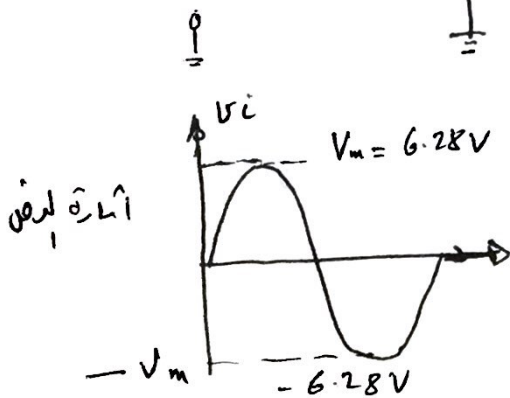
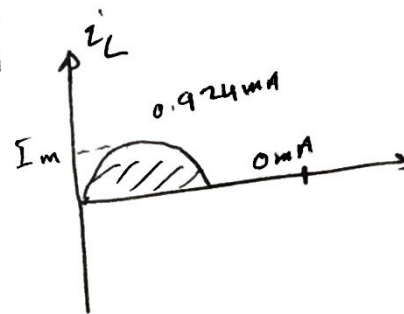
$$= 2.85 \; mA$$

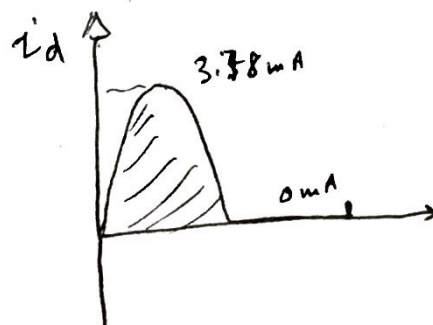
v_i: $6.98V$, $-6.98V$

$i_R (i_d)$: $2.85 \; mA$

21 اذا تم ربط مقاومة حمل قدرها 6.8kΩ لدائرة مقوم نصف الموجة السابقة ارسم شكل الجهد على والتيار المار في مقاومة الحمل v_L ، i_L (استخدام التمثيل الثاني)

الحل

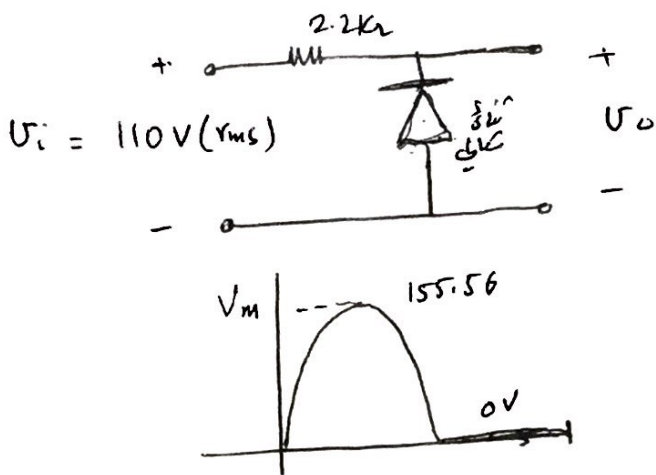
$$V_m = \frac{V_{dc}}{0.318} = \frac{2V}{0.318} = 6.28$$

v_L 6.28V 0V

i_L 0.924mA I_m 0mA

$$I_{L(max)} = \frac{6.28V}{6.8k\Omega} = 0.924\,mA$$

$$I_{1(max)} = \frac{6.28}{2.2k\Omega} = 2.855\,mA$$

$$I_{D(max)} = I_{L(max)} + I_{1(max)} = 0.924mA + 2.855mA = 3.78\,mA$$

م.م سرى ...

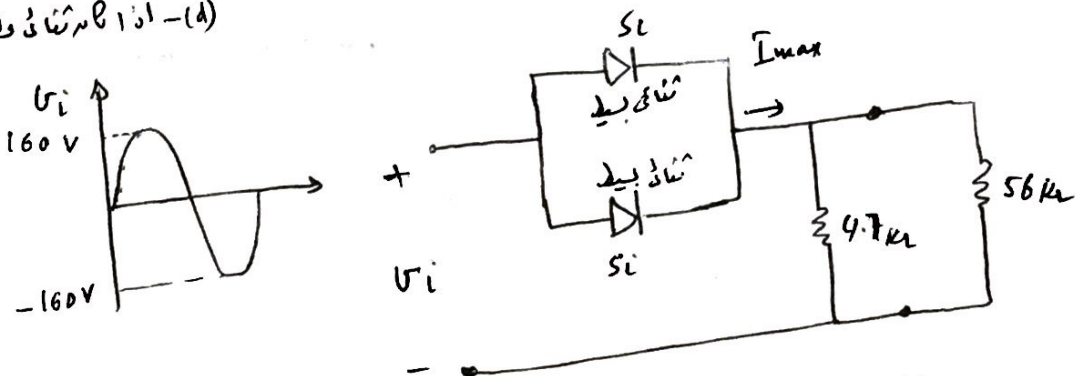
22 - لدائرة الثنائي المبينة في الشكل التالي أوجد وارسم الجهد الخارج v_o والصيغة الجهد المستمر الناتج من هذه الدائرة V_{dc} .

$v_i = 110V(rms)$, $2.2k\Omega$, ثنائي مثالي , v_o

الحل :-

$$V_m = \sqrt{2}\,(110V) = 155.56V$$

$$V_{dc} = 0.318\,V_m = 49.47V$$

23 - اذا كانت القدرة القصوى لأي ثنائي في الدائرة المبينة في الشكل ادناه ($P_{max} = 14mW$)
(a) - احسب اقصى تيار لكل ثنائي (b) - اوجد I_{max} ، عندما ($V_{imax} = 160V$) (c) - اوجد التيار لكل ثنائي باستخدام النتيجة لما
(d) - اذا كان ثنائي واحد في الدائرة أوجد تيار الثنائي وقارنه بأقصى قيمة لتيار الثنائي

v_i: 160 V, −160V ; Si ثنائي بسيط, Si ثنائي بسيط ; I_{max} ; $4.7k\Omega$; $56k\Omega$

الحل :-

a) $P_{max} = 14mW = (0.7V)\,I_D \Rightarrow I_D = \frac{14mW}{0.7V} = 20mA$

$V_R = V_m - 0.7 = 159.3V$

b) - $(4.7k\Omega \,//\, 56k\Omega) = 4.34k\Omega \Rightarrow$

$\therefore I_{max} = \frac{159.3V}{4.34k\Omega} = 36.71mA$

c) $I_{diode} = \frac{I_{max}}{2} = \frac{36.71mA}{2} = 18.36mA$

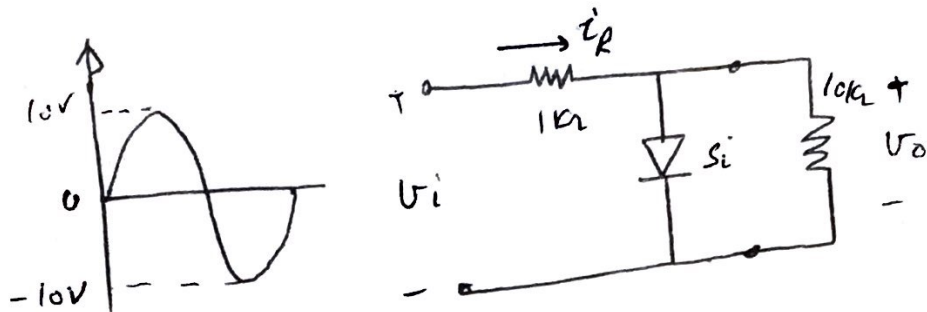
$I_D = 20mA > 18.36mA$

d) - only one diode in the circuit

$\therefore I_{diode} = 36.71mA > 20mA$

من الواضح أن قيمة تيار الثنائي في الفقرة (d) تشكل خطورة على الثنائي لأنها اكبر من قيمة (20mA) التي يتحملها الثنائي
- في مثل هذه الحالة يفضل ربط ثنائيات على التوازي لتقسيم التيار والمحافظة على الثنائي

(23) - للدائرة الثنائي المبينة في الشكل التالي ارسم شكل اشارة الخرج v_o ، والتيار i_R

i_R → ; + v_i − ; 1kΩ ; Si ; 10kΩ ; + v_o −

- الثنائي يكون في حالة توصيل عندما يكون جهد الخرج $(v_o = 0.7V)$

$$\therefore \quad v_o = \frac{(10k\Omega)(v_i)}{10k\Omega + 1k\Omega} = 0.7$$

$$\therefore \quad v_i = 0.77\ V$$

عندما يكون جهد الدخل $\Leftarrow$ $V_i \geq 0.77$ الثنائي في حالة توصيل وجهد الخرج $(v_o = 0.7V)$

$\Leftarrow$ $v_i < 0.77V$ الثنائي يكون في حالة عدم توصيل ويتم حساب جهد الخرج بقاعدة مجزئ الجهد

$$v_o = \frac{10k\Omega\ (v_i)}{10k\Omega + 1k\Omega} = 0.909\ v_i$$

For $v_i = -10$

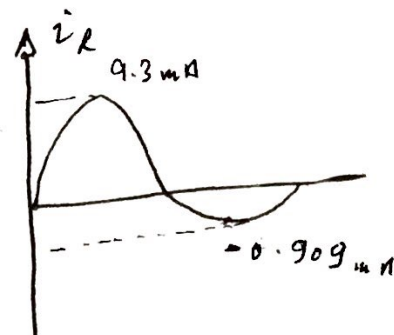
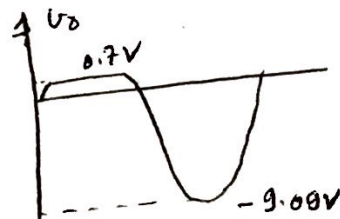
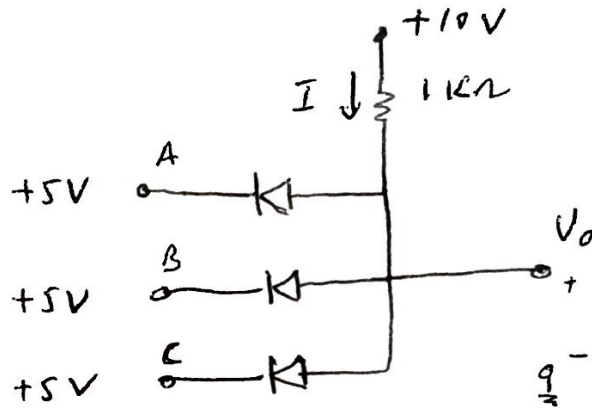
$v_o = 0.909(-10V)$

$= -9.09V$

- عندما تكون اشارة الخرج تساوي $(v_o = 0.7V)$

$v_{R\,max} = v_{i\,max} - 0.7V = 10V - 0.7V = 9.3V$

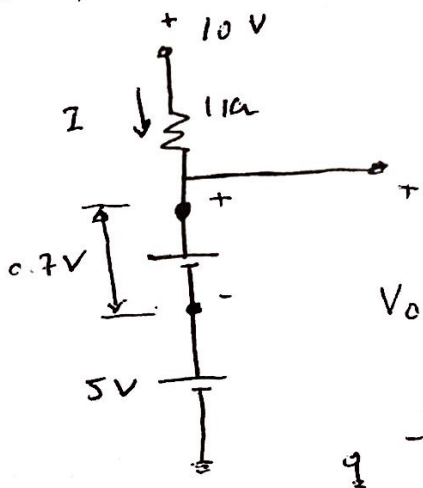
$$\therefore \quad I_{R(max)} = \frac{9.3V}{1k\Omega} = 9.3\ mA$$

$$I_{max}\ (reverse) = \frac{10V}{1k\Omega + 10k\Omega} = 0.909\ m$$

(24) أوجد خرج الدائرة المبينة في الشكل

+10V
I ↓ 1kΩ
A +5V
B +5V
C +5V
V_o + −

الحل: — حيث أن الأنود لكل الثنائيات مربوط على جهد (10V) خلال المقاومة (1kΩ) والكاثود لكل ثنائي على جهد (5V)

∴ الأنود لكل ثنائي أكثر موجبية من الكاثود وبالتالي فإن كل الثنائيات ستكون في حالة توصيل

— بافتراض أن الثنائيات متطابقة فيكتفى برسم فرع واحد منها كالتالي

KVL

$$10V - I(1k\Omega) - 0.7 - 5 = 0$$

$$10V - 5.7V = I(1k\Omega)$$

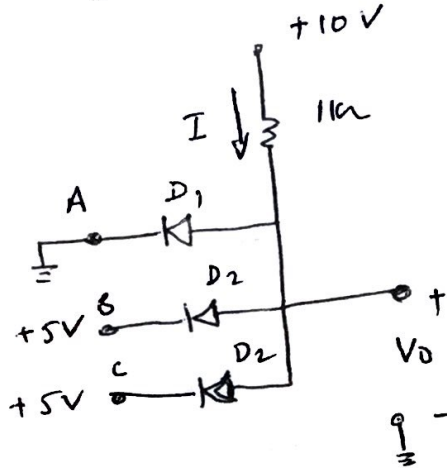
$$\Rightarrow 4.3V = I(1k\Omega)$$

$$\therefore I = \frac{4.3V}{1k\Omega} = 4.3\,mA$$

$$V_o = 0.7V + 5 = 5.7V$$

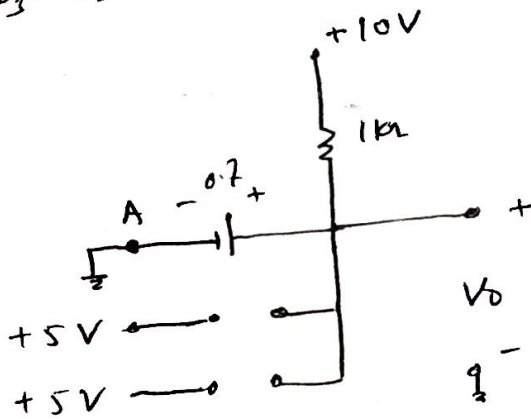
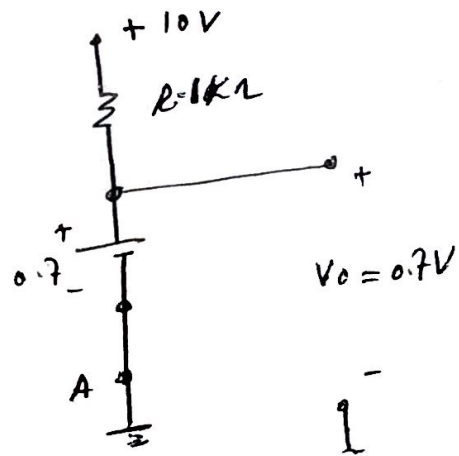
(25) - لدائرة الثنائيات في المسألة السابقة اذا تم وضع الجهود $(A=0, B=5, C=5)$ احسب خرج الدائرة

الحل

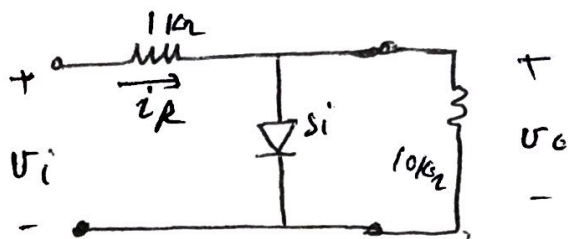
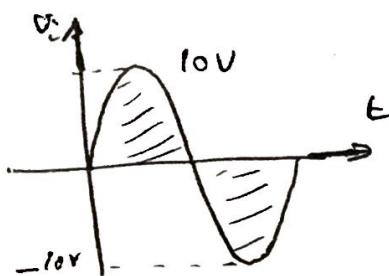
حيث انه انود D_1 موصل بجهد يساوي صفر

$\therefore$ D_1 يصبح في حالة التوصيل

ويستبدل $(V_T=0.7V)$

هذا الجهد يصبح على انود D_2 ، D_3

وبالتالي يصبحان في حالة عدم توصيل (دائرة مفتوحة) لان الكاثود D_2 ، D_3 اكثر موجبية من الانود

$$V_o = 0.7 \text{ volt}$$

⊛ للدائرة الثنائي المبينة في الشكل التالي ارسم شكل اشارة جهد المخرج والتيار في المقاومة R

1kΩ, i_R, Si, 10kΩ, + v_i -, + v_o -

الحل :- الثنائي يكون في حالة التوصيل عندما تكون

$$v_o = 0.7V = \frac{10k\Omega\,(v_i)}{10k\Omega + 1k\Omega} \Rightarrow \boxed{v_i = 0.77V}$$

- for $v_i \geq 0.77V$ الثنائي يكون في حالة التوصيل

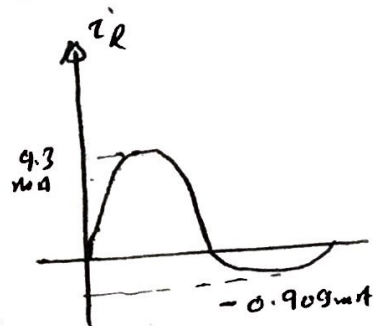
∴ $\boxed{v_o = 0.7V}$

- for $v_i < 0.77V$ الثنائي يكون في حالة عدم التوصيل

$$\therefore v_o = \frac{10k\Omega\,(v_i)}{10k\Omega + 1k\Omega} = 0.909\,v_i$$

i_R ; 9.3 mA ; -0.909 mA

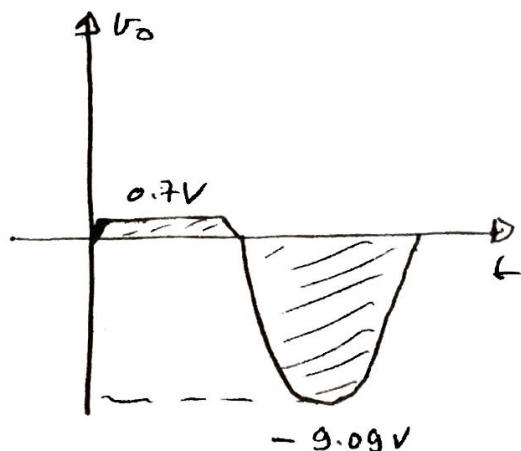
- for $v_i = -10V$

$$\therefore v_o = 0.909(-10V) = -9.09V$$

- when $v_o = 0.7V$ $\quad V_{R(max)} = V_{i(max)} - 0.7V = 10 - 0.7 = 9.3V$

$$I_{Rmax} = \frac{9.3V}{1k\Omega} = 9.3mA$$

$$I_{Rerese} = \frac{10V}{1k\Omega + 10k\Omega} = 0.909\,mA$$

١ / ٤

٣ —

⊛ مقوم الجسر الكامل (دائرة القنطرة) عليه الجهد دخل يساوي ($v_i = V_{rms} = 120V$) ومقاومة الحمل ($R_L = 1k\Omega$) أوجد

- باستخدام النموذج البسيط للثنائي أوجد قيمة الجهد المستمر عبر مقاومة الحمل
- أوجد قيمة (PIV) المطلوبة لكل ثنائي
- اوجد اقصى قيمة للتيار في كل ثنائي خلال التوصيل
- اوجد القدرة للثنائي

الحل :

a) لايجاد القيمة القصوى لاشارة الدخل

$$V_m = \sqrt{2}\,V_{rms} = \sqrt{2}\,(120V) = 169.7V$$

$$V_{L(max)} = V_{i(max)} - 2(0.7) = 168.3V$$

$$V_{dc} = 0.636(168.3V) = 107.04V$$

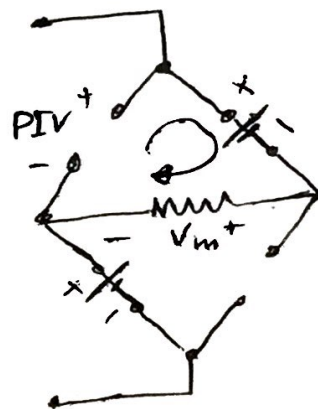
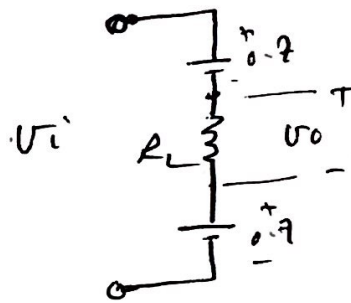
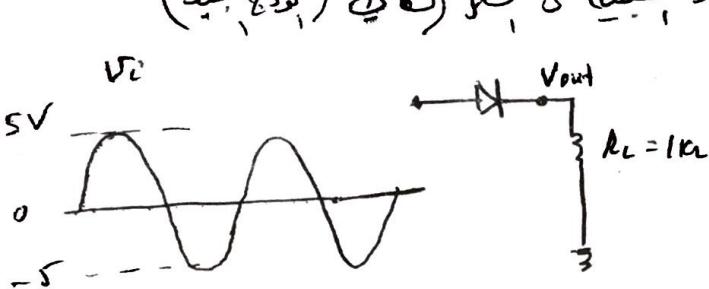
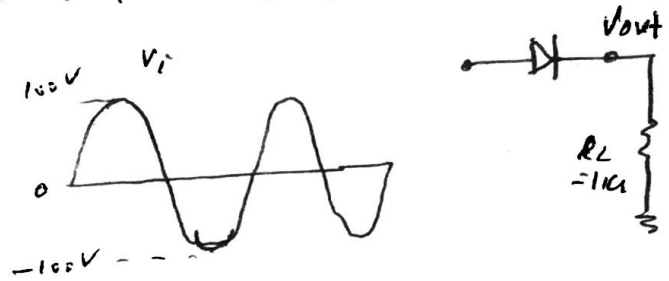
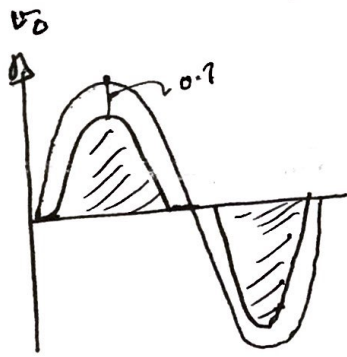
b) $PIV = V_m(\text{load}) + V_D$ →

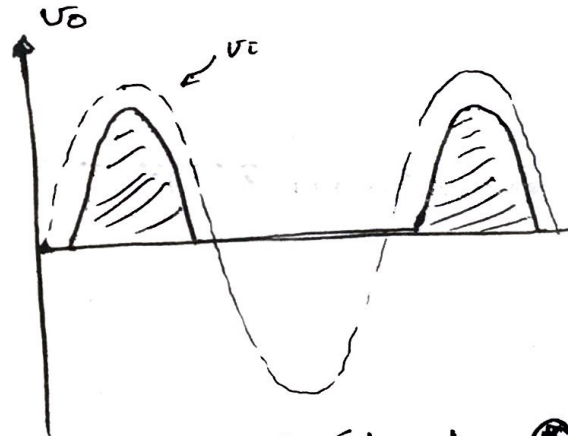
$$= 168.3V + 0.7 = 169V$$

$$I_{D(max)} = \frac{V_{L(max)}}{R_L} = \frac{168.3V}{1k\Omega} = 168.3mA$$

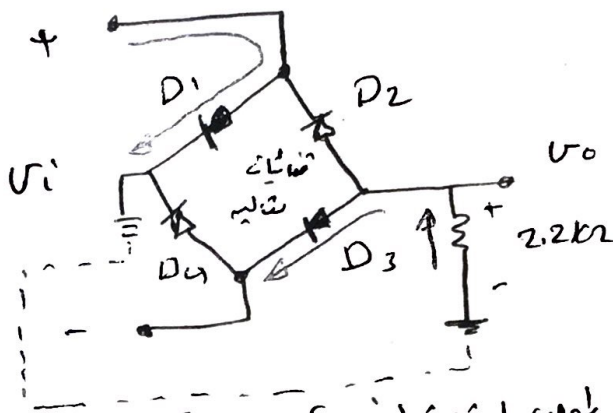
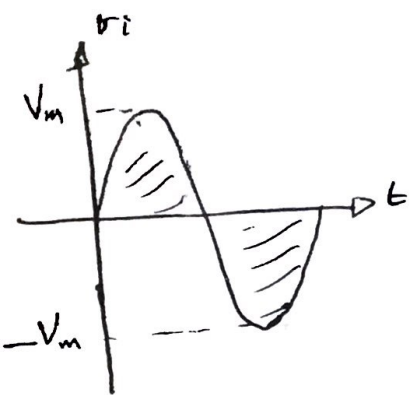
c) - $P_{max} = V_D I_D = (0.7V)\,I_{max}$

$$= (0.7V)(168.3mA)$$

$$= 117.81\ mW$$

* - اوجد وارسم شكل اشارة الخرج للدوائر المبينة في الشكل التالي (النموذج البسيط)

$$V_o = V_i - 0.7$$
$$= 5V - 0.7V$$
$$= 4.3V$$

$$V_o = V_i - 0.7$$
$$= 100 - 0.7$$
$$= 99.3V$$

* - اوجد اقصى جهد خرج للدائرة المبينة في الشكل التالي علماً أن النسبة بين لفات الملف الابتدائي والثانوي للمحول تساوي $(n = 0.5)$

$$n = \frac{N_2}{N_1}$$

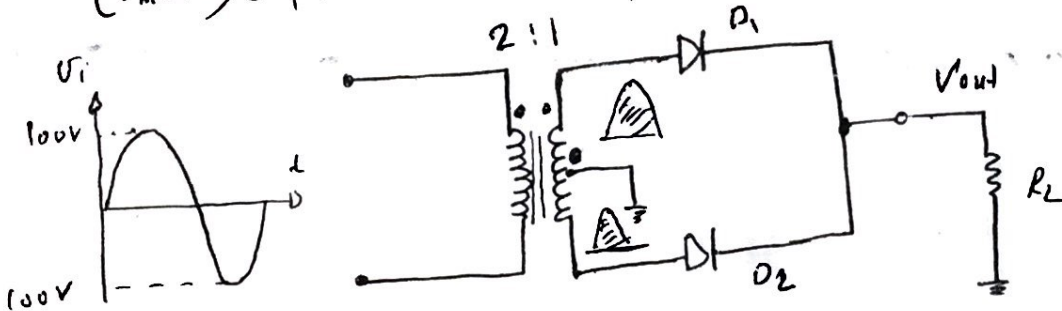
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1}$$
$$= n V_1$$

$\Rightarrow V_{prim} = 170V$ الجهد على الملف الابتدائي

الجهد على الملف الثانوي $\Leftarrow V_{m(sec)} = n V_{prim} = (0.5)(170V) = 85V$

عندما يكون الثنائي في حالة التوصيل $\Leftarrow (V_D = 0.7V)$

∴ جهد الخرج $\Leftarrow V_{out} = V_{sec} - 0.7V$

$= 85V - 0.7V = 84.3V$ #

⊛ للدائرة تعرض الموجة الكاملة المبينة في الشكل التالي أوجد جهد الإشارة على كل نصف من الملف الثانوي للمحول ثم أوجد الجهد على المقاومة R_L عندما يكون جهد الدخل $(V_m = 100V)$

حيث أن $n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{2} = 0.5$

∴ جهد الملف الثانوي $\Leftarrow V_{m sec} = 0.5 (100V)$

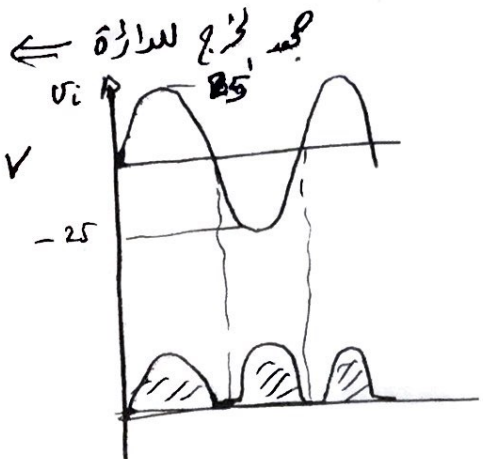
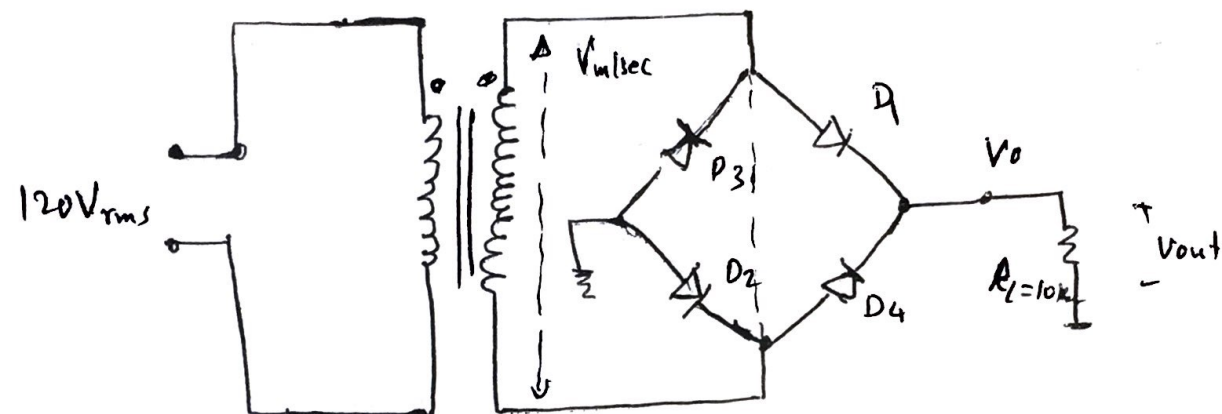
$= 50V$

∴ أقصى قيمة لجهد الإشارة على كل جزء من الملف الثانوي = $\boxed{25V}$

∴ عندما يكون الثنائي D_1 في حالة التوصيل $\Leftarrow (V_D = 0.7V)$

جهد الخرج للدائرة $\Leftarrow$

$V_o = \frac{1}{2} V_{sec} - 0.7$

$= 25 - 0.7 = 24.3V$

⊛ - اوجد جهد الخرج للدائرة التقويم المبينة في الشكل التالي - المحول يعطي جهداً على الملف الثانوي قدرة ($V_{rms} = 12V$) في حين أن الجهد على الملف الابتدائي يساوي $120V(rms)$. استخدم التقريب (البسيط) .

- أقصى جهد على الملف الثانوي

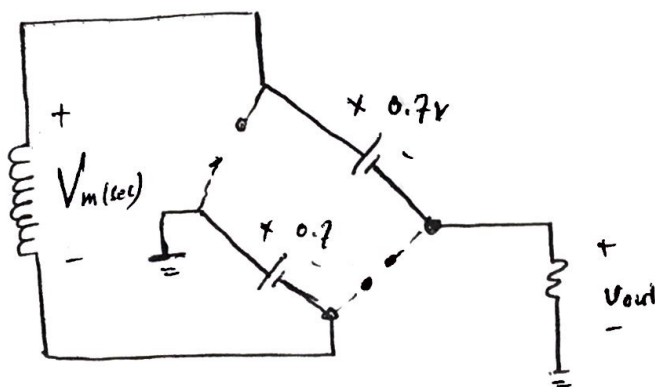
$$V_{m(sec)} = 1.414\ V_{rms}$$

$$= 1.414\,(12V) \cong 17V$$

- في النصف الموجب الثنائيات (D_1 & D_2) يكونا في حالة التوصيل

$$\therefore V_{out} = V_{m(sec)} - 2(0.7V)$$

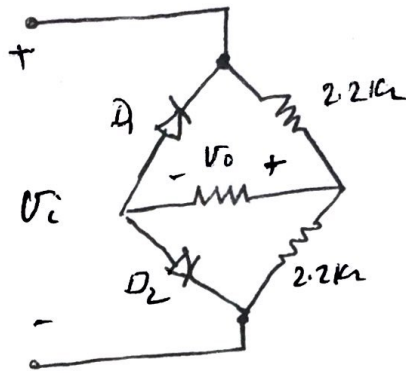
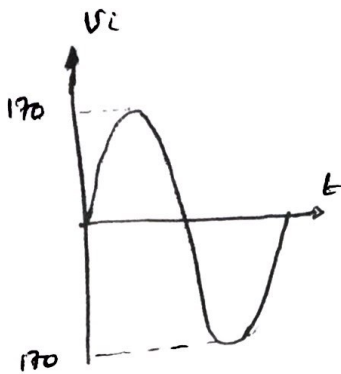
$$= 17V - 1.4V$$

$$= 15.6V$$

$$PIV = V_{m(sec)} + 0.7V$$

$$= 16.3V$$

- في النصف السالب يتم عكس وضع الثنائيات (D_3, D_4) في حالة التوصيل

④ أوجد وارسم شكل اشارة الخرج لدائرة الثنائي المبينة في الشكل التالي ثم أوجد قيمة الجهد المستمر الناتج عن هذه الدائرة

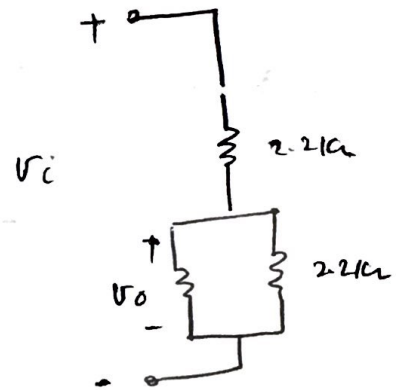
(ideal diodes)

+ Vi −

D_1 2.2kΩ V_o 2.2kΩ D_2

الحل: - في النصف الموجب لاشارة الدخل - يكون الثنائي D_1 في حالة التوصيل والثنائي D_2 في حالة عدم التوصيل

$2.2k\Omega \,//\, 2.2k\Omega = 1.1k\Omega$

$$V_o = \frac{1.1k\Omega\,(170)}{1.1k\Omega + 2.2k\Omega} = 56.67V$$

$$V_o = \frac{1.1k\Omega\,(170V)}{1.1k\Omega + 2.2k\Omega} = 56.67$$

- في الجزء السالب من اشارة الدخل D_1 (التوصيل) - (D_2) لعدم التوصيل

$$V_{dc} = 0.636\,(56.67)$$

$$= 36.04\,V$$

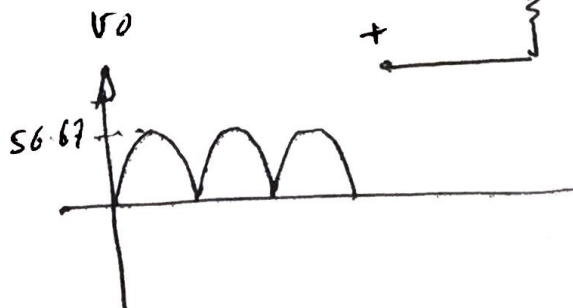
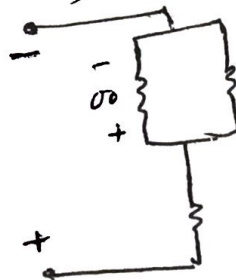
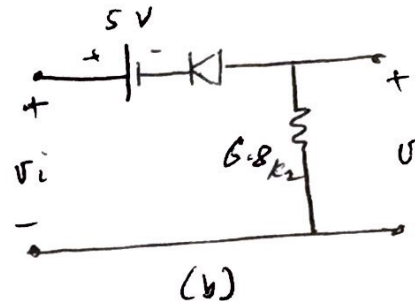
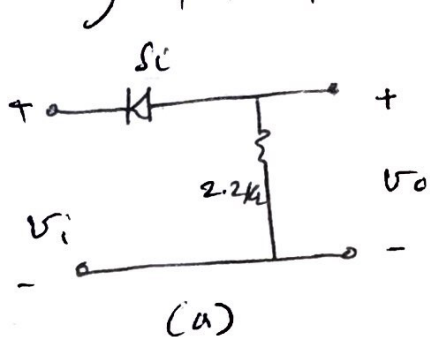
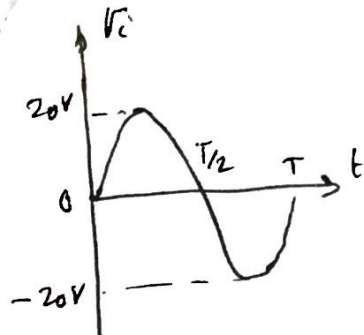
V_o

56.67

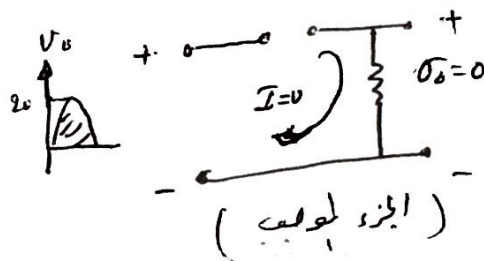
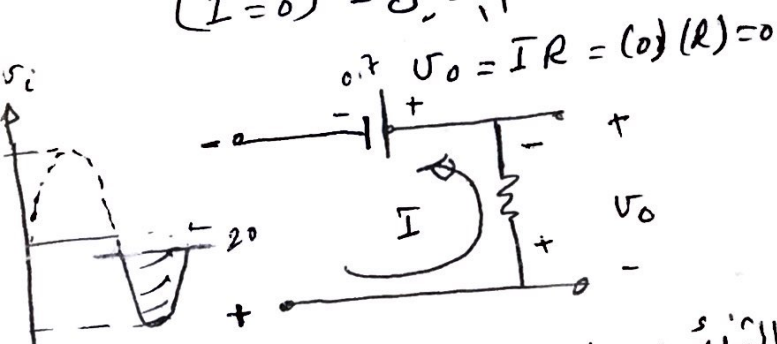
⊛ أوجد جهد الخرج لكلا الدائرتين المبينتين في الشكل التالي

v_i: 20V, 0, -20V, T/2, T, t

(a): Si, 2.2kΩ, v_i, v_o

(b): 5V, 6.8kΩ, v_i, v

a) - $(0 - T/2)$ - الثنائي سيكون في حالة عدم التوصيل - $(I = 0)$

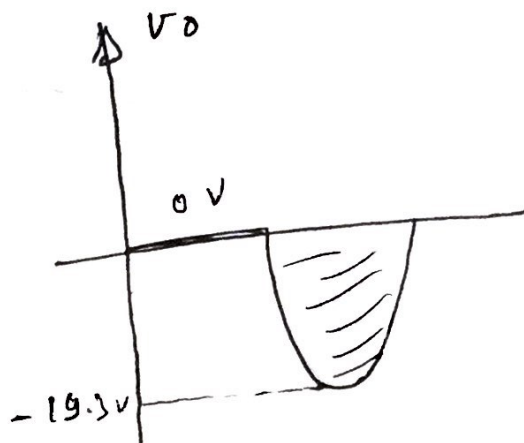
$v_o = IR = (0)(R) = 0$

(الجزء الموصل)

$(T/2 \rightarrow T)$ ← الثنائي يصبح في حالة التوصيل عندما يصل جهد الدخل $(-0.7V)$ هي قيمة الجهد الذي يعمل فيه الثنائي

$\therefore \; -20V < v_i \leq -0.7V$

$v_o = v_i - 0.7$

when $v_i = -20V \Rightarrow v_o = (-20V) - (-0.7V) = 19.3$

$v_i = -0.7V \Rightarrow v_o = -0.7V - (-0.7V) = 0$

v_o: 0 V, -19.3V

ط) -

- من خلال فحص الدائرة لكي أن نقوم ببعض الافتراضات للتعرف على سلوكها

عندما $v_i = 5V$

$v_o = 5V - 5V = 0$

أي قيمة لجهد الدخل $\boxed{v_i > 5V}$ تجعل الثنائي في حالة الانحياز العكسي

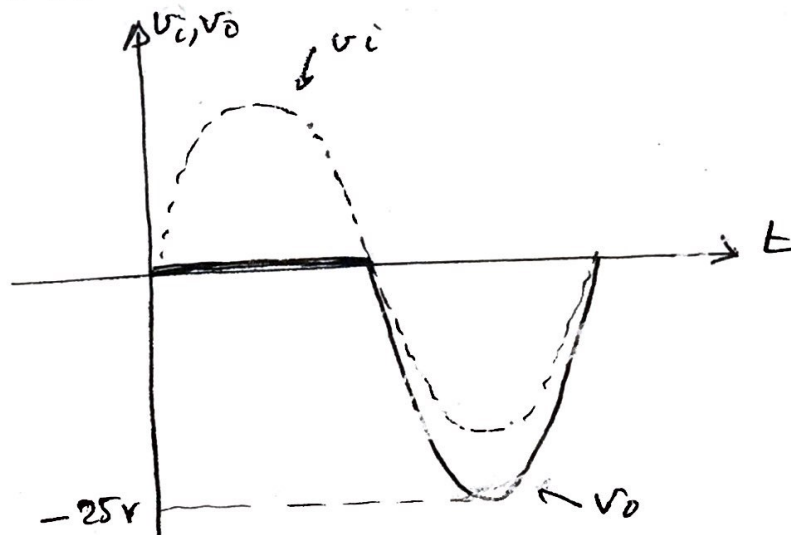
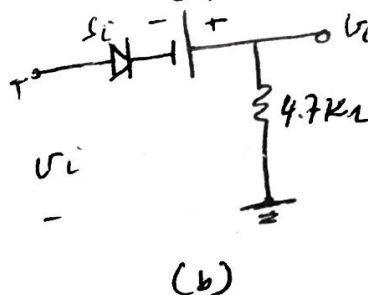
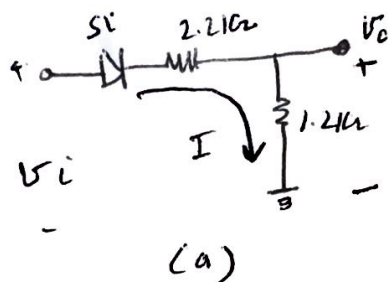
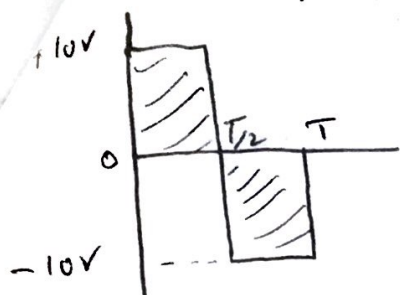
- جهد الخرج خلال النصف الموجب للإشارة يساوي صفر

خلال النصف السالب للإشارة الدخل :

عندما يكون $v_i = -20V$

$\therefore v_o = -20V - 5V = -25V$

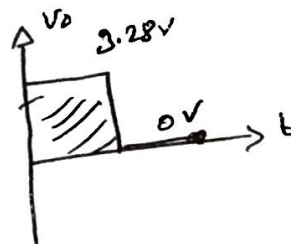
٤

* أوجد جهد الخرج لدائرتي الثنائي المبينة في الشكل التالي :

a) - $(0 - T/2)$ - الثنائي في حالة توصيل

$$\therefore V_o = \frac{1.2K\Omega(10-0.7)V}{1.2K\Omega + 2.2K\Omega} = 3.28\,V$$

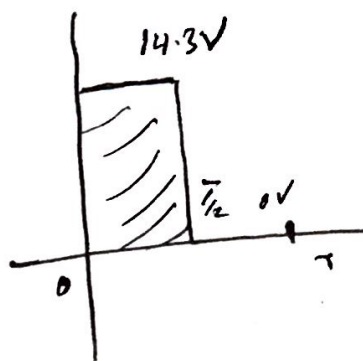
$(T/2 - T)$: $V_i = -10V$

الثنائي في حالة لعدم التوصيل

$V_o = 0$

b) - $(0 - T/2)$ - الثنائي في حالة توصيل

$$V_o = 10V - 0.7V + 5 = 14.3V$$

$(T/2 - T)$: $V_i = -10V$

الثنائي في حالة لعدم التوصيل

$V_o = 0\,V$

⊛ اوجد جهد الخرج لدائرتي الثنائي المبينة في الشكل التالي:

(a) - $(0 - T/2)$ عندما يكون جهد الدخل $\boxed{v_i = 20V}$ يكون الثنائي في انحياز عكسي

$\therefore \boxed{v_o = 0}$

$(T/2 - T)$ عندما يكون جهد الدخل $\boxed{v_i = -5V}$ يكون الثنائي في انحياز امامي

KVL:

$-5V + 2V - v_o = 0$

$\therefore \boxed{v_o = -3V}$

v_o 0V 0V -3V

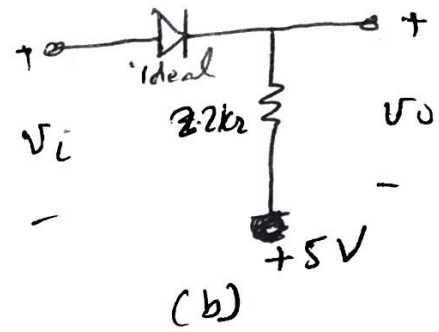
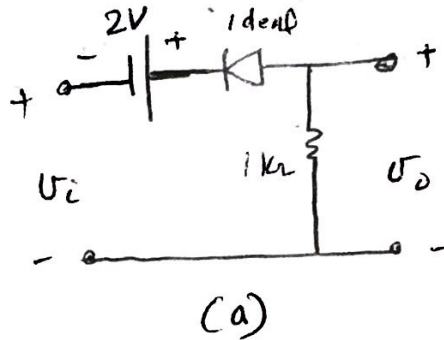
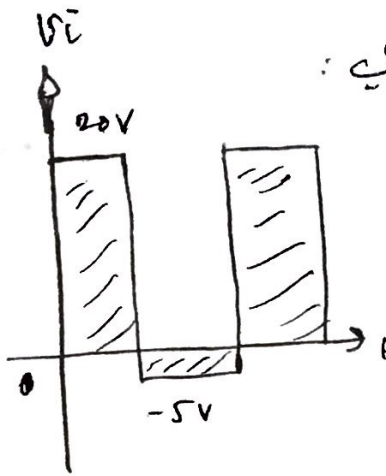
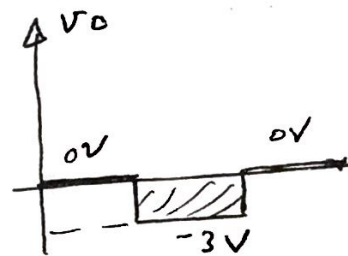
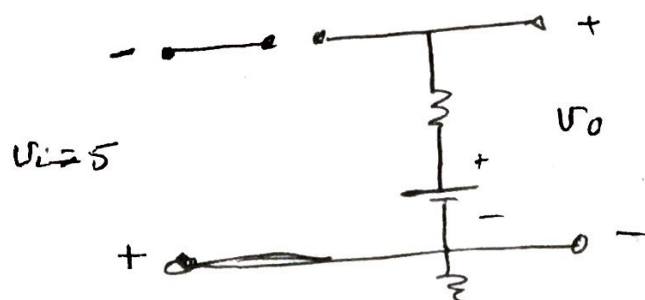
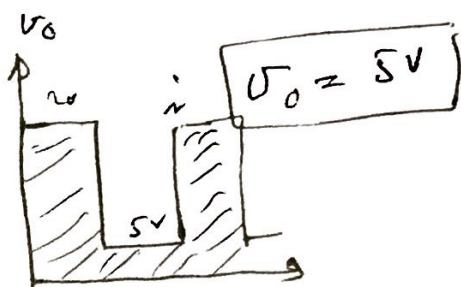
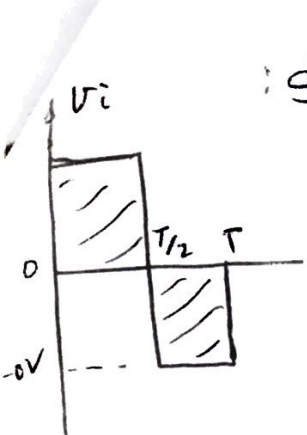
(b) - $(0 - T/2) \Leftarrow \boxed{v_i = 20V} \Leftarrow v_o = 20V$

$(T/2 - T) \Leftarrow \boxed{v_i = -5V}$

$\therefore$ كل من الجزء السالب من اشارة الدخل + المصدر (5V) يجعلان الثنائي في انحياز عكسي

في هذه الحالة الثنائي يفصل الدخل عن الخرج

$v_i = 5$ v_o

$\therefore \boxed{v_o = 5V}$

* أوجد وارسم شكل جهد الخرج للدائرة المبينة في الشكل التالي :

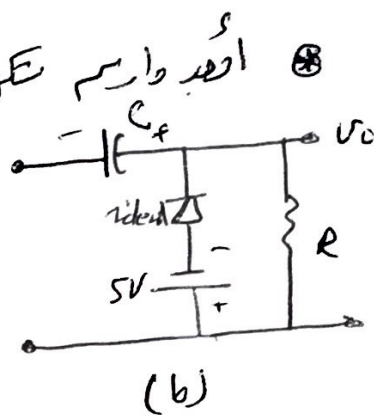
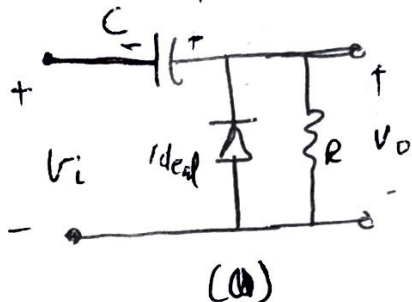
v_i — 0 — $T/2$ — T — -0V

C_1 + — v_i — Ideal — R — v_o —

(a)

C_1 — Ideal — 5V — R — v_o

(b)

(a) - اشارة الدخل خلال الفترة $(T - T/2) \Leftarrow$ $v_i = -20V$

∴ الثنائي في حالة التوصيل (on-state) $\Leftarrow$ $v_c = 20V$

خلال هذه الفترة يكون (دائرة قصر) وبالتالي فان جهد الخرج

$v_o = 0$

عندما تصبح اشارة الدخل موجبة $v_i = 20V$

∴ الثنائي يصبح في حالة قطع (off-state) $\Leftarrow$ دائرة مفتوحة ويكون جهد الخرج

$v_o = v_i + v_c$

$v_o = 20V + 20V = 40V$

الناتج
مجموع (اشارة الدخل = 40 فولت) = مجموع اشارة الخرج (40V)

40V — $T/2$ — 0 — T — $3T/2$

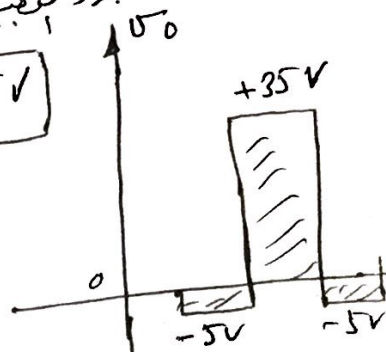
(b) - نبدأ بالجزء السالب من اشارة الدخل $v_i = -20V$ $\Leftarrow$ الثنائي (on-state) دائرة قصر
المكثف يشحن الى جهد (-15V)
خلال هذه الفترة يكون جهد الخرج

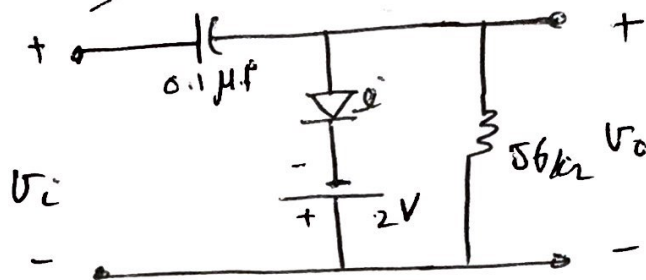
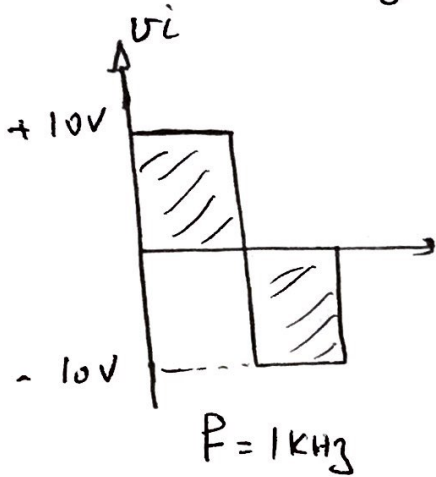
$v_o = -5V$ $\Leftarrow$ جهد البطارية (-5V)

الجزء الموجب من اشارة الدخل $v_i = 20V$ $\Leftarrow$ الثنائي (off-state) - دائرة مفتوحة

$v_o = v_i + v_c = 20V + 15V = 35V$

v_o — +35V — 0 — -5V — -5V

⊛ للدائرة الثنائي المبينة في الشكل التالي

- حدد نوع ووظيفة الدائرة
- احسب قيمة (5τ)
- قارن (5τ) الى نصف زمن اشارة الدخل
- ارسم اشارة الخرج الناتجة

+ 0.1μf +
vi 2V 56kΩ vo
− −

- دائرة تقليد (Clamper)

$$\tau = RC = (56k\Omega)(0.1\mu f) = 5.6\,msec$$

$$5\tau = 5(5.6\,ms) = 28\,ms$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1000Hz} = 1\,msec \Rightarrow T/2 = 0.5\,ms$$

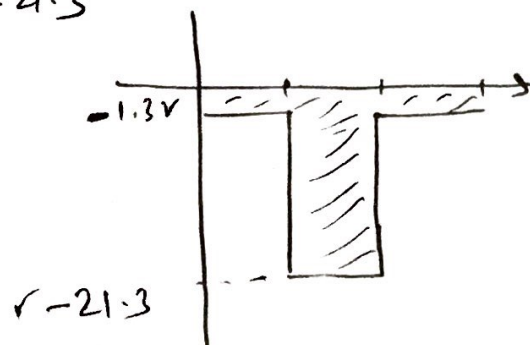
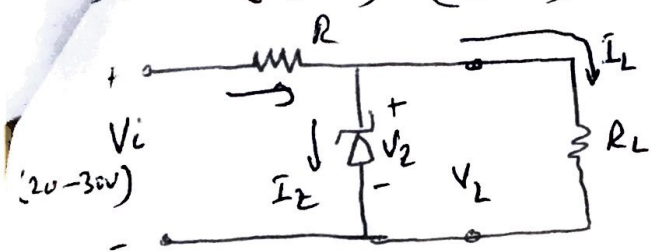
$$\therefore 5\tau \gg \frac{T}{2} \Rightarrow 28\,ms \gg \frac{T}{2} = 0.5\,ms$$

- $(0 - T/2)$ الجزء الموجب لاشارة الدخل ⟸ الثنائي (on-state)

$$\therefore v_o = -2V + 0.7 = -1.3V$$

$$v_c = 10V + 2V - 0.7V = 11.3V$$

- $(T/2 \to T)$ الجزء السالب ⟸ الثنائي (off-state)

$$v_o = -10V - 11.3V = -21.3$$

* لدائرة الزينر اذا كانت $(R = 20\Omega)$ ، $(V_Z = 18V)$ ، $(R_L = 200\Omega)$ - اذا كانت V_i تتغير من $(20-30V)$

اوجد الاتي :-

- اقصى وادنى قيم لتيار الزينر
- اقصى وادنى قدرة لثنائي الزينر
- ماهي القدرة المطلوبة عند اختيار المقاوم R

الحل :- نفرض ان ثنائي الزينر في حالة توصيل (on-state)

$$\therefore V_Z = V_L = 18\,V$$

$$\therefore I_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{18V}{200\Omega} = 90\,mA$$

$$I_{R(min)} = \frac{20V - 18V}{20\Omega} = 100\,mA$$

$$I_{Z(min)} = I_R - I_L = (100mA) - (90mA) = 10\,mA$$

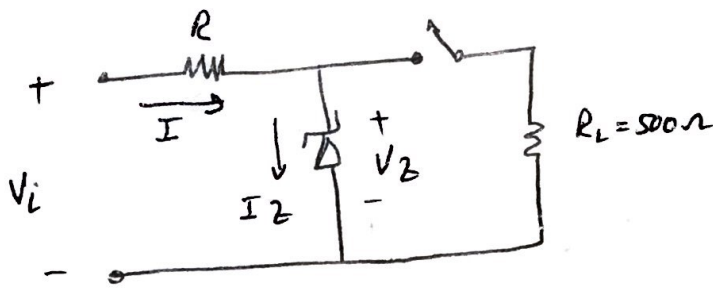
$$I_{R(max)} = \frac{(30V) - (18V)}{20\Omega} = 600\,mA$$

$$I_{Z(max)} = I_{R(max)} - I_L = 600\,mA - 90\,mA = 510\,mA$$

$$P_{Z(min)} = V_Z I_{Z(min)} = (18V)(10mA) = 180\,mW$$

$$P_{Z(max)} = V_Z I_{Z(max)} = (18V)(510mA) = 9.18W$$

$$P_{R(max)} = (I_{R\,max}^2)R = (0.6)^2(20) = 7.2W$$

R, I, I_Z, V_Z, V_i, $R_L = 500\,\Omega$

(*) - للدائرة المبينة في الشكل أوجد قيمة المقاومة R والقدرة المبددة فيهما

$V_Z = 10\,V$ $\qquad$ $V_{in(min)} = 15\,V$

$P_Z = 2\,W$ $\qquad$ $V_{in(max)} = 20\,V$

$I_{Z(min)} = 5\,mA$

$R_L(min) = R_L = 500\,\Omega$ (المفترض انها 2)

الحل :-

$$R = \frac{V_{in}(min) - V_Z}{I_Z(min) + \frac{V_Z}{R_L(min)}} = \frac{(15-10)\,V}{(5\,mA) + \frac{10\,V}{500\,\Omega}} = 200\,\Omega$$

$$P_R = \frac{V_R^2}{R} = \frac{(20-10)^2}{200\,\Omega} = 0.5\,W$$

$V_{in(max)} = 20\,V$ $\qquad$ $I_L(min) = 0$ (open switch)

$$I_{Z(max)} = \frac{V_{in(max)} - V_Z}{R} - I_L(min) = \frac{20-10}{200} - 0 = 50\,mA$$

$$P_{Z(max)} = (10\,V)(50\,mA) = 0.5\,W$$

١١٠

* - مصدر جهد مستمر غير منتظم يستخدم جهد متغير من دائرة مقوم موجي يتغير ما بين (18 الى 22) فولت . صمم دائرة زينر لتعطي جهداً قدره 15 فولت لتغذية حمل له تيارات ($I_{L(min)} = 20mA$) و ($I_{L(max)} = 120mA$) - حدد قيم المقاومة R أثناء بالإضافة الى ذلك القدرة . أفرض أنّ

$$I_{Z(min)} = 5\% \, I_{L(max)}$$

الحل :- المقاومة R يتم حسابها عند أسوء الحالات عند القيمة الدنيا لتيار الزينر . الحد الأدنى لتيار الزينر ينشأ عندما يكون جهد الدخل يساوي قيمته الدنيا $V_{in(min)}$ وتيار الحمل I_L في قيمته القصوى $I_{L(max)}$

$$\therefore \quad R = \frac{V_{in}(min) - V_Z}{I_L(max) + I_Z(min)} = \frac{(18-15)V}{(120mA) + (0.5 I_{L(max)})}$$

$$= \frac{(18-15)V}{120+6} = 23.8\Omega \simeq 24\Omega$$

$$P_{R(max)} = \frac{(22-15)^2}{24} = 2.04\,W \quad (5-7\,watt)$$

$$I_{Z(max)} = \frac{22-15}{24} - 0.02A = 272mA$$

$$P_{Z(max)} = (15V)(272mA) = 4.08\,W \quad (5-watt\ zener)$$

I_L

$R = 24\Omega$

$P_R = 5W$

R_L

+ 15V −

I_Z

V_i

22

18

+

−

$P_Z = 5\,watt$

الالكترونيات I
م.م. مريم ...

٭ للدائرة المبينة في الشكل اوجد الاتي

- V_0 عند I_{ZK} ، I_{ZM}
- احسب قيمة المقاومة R الواجب استخدامها في الدائرة
- اوجد القيمة الدنيا للمقاومة $R_{L(min)}$ الواجب استخدامها في الدائرة

$R = ?$, $V_{in} = 24V$, $V_Z = 15$, V_0, R_L

ΔV_Z, I_{ZK}, I_Z, ΔI, I_{ZM}

$I_Z = 17mA$ $\quad I_{ZK} = 0.25mA$, $r_Z = 14\Omega$, $P_{Z(max)} = 1\,Watt$

عند $I_Z = 17mA$:-

$$V_{out} = V_Z - \Delta I_Z (r_Z) = 15V - (I_Z - I_{ZK}) r_Z$$
$$= 15V - (16.75mA)(14\Omega) = 14.76V$$

$$I_{ZM} = \frac{P_{Z(max)}}{V_Z} = \frac{1\,Watt}{15V} = 66.7mA$$

عند $I_{ZM} = 66.7mA$:-

$$V_{out} = V_Z + \Delta I_Z r_Z = 15V + \Delta I_Z r_Z$$
$$= 15V + (I_{ZM} - I_Z) r_Z = 15V + (49.7mA)(14\Omega) = 15.7V$$

$$R = \frac{V_{in} - V_{out}}{I_{ZM}} = \frac{24V - 15.7V}{66.7mA} = 124\Omega \simeq (130\Omega)$$

24V, R, 15.7V, $I_{ZM} = 66.7mA$

No load resistance R_L (open)

24V, I, 14.76, I_Z, R_L, I_L

$$I = \frac{V_{in} - V_{out}}{R} = 71\,mA$$

$$I_L = I - I_{ZK} = 70.75mA$$

$$R_{L(min)} = \frac{V_{out}}{I_L} = \frac{14.76}{70.75mA} = 209\Omega$$